
Photopische Helligkeitswahrnehmung in der Innenraumbeleuchtung mit unterschiedlichen Lichtquellen

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Wjatscheslaw Pepler
Geboren am 7. August 1982 in Odessa/Ukraine

Referent:	Prof. Dr.-Ing. habil. T. Q. Khanh
Korreferent:	Prof. Dr. sc. nat. Ch. Schierz
Tag der Einreichung:	06.05.2015
Tag der mündlichen Prüfung:	25.01.2016

Darmstadt 2017
D17

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Einleitung.....	6
3	Aufgabenstellung.....	10
4	Helligkeitsbewertung	11
4.1	Photometrischer Normalbeobachter.....	11
4.2	Gründe für Abweichungen in der Wahrnehmung.....	12
4.3	Heterochromatischer Helligkeitsabgleich.....	17
4.4	Äquivalente Leuchtdichte	18
4.5	Weitere Modelle	27
4.6	Helligkeitsskalierung.....	29
4.7	Helligkeitswahrnehmung großer Gesichtsfelder	30
4.8	Ableitung von Hypothesen.....	40
5	Methoden.....	41
5.1	Versuchsraum und Beleuchtung	41
5.2	Charakterisierung der Lichtszenarien	45
5.3	Größe des Testfelds	61
5.4	Befragungsmethodik.....	62
5.5	Probanden	63
6	Ergebnisse	65
6.1	Helligkeitsbewertung.....	65
6.2	Normalverteilung und Varianzhomogenität	70
6.3	Varianzanalyse.....	71
6.4	Regressionsanalyse.....	75
6.5	Anwendung der Helligkeitsmodelle.....	79
6.6	Interpersonelle Unterschiede.....	83
7	Diskussion	87
7.1	Helligkeitsskalierung.....	87
7.2	Einfluss der Farbtemperatur	88
7.3	Farbwiedergabe	90

7.4	Helligkeitsmodelle.....	90
7.5	Interpersonelle Unterschiede.....	92
7.6	Empfehlungen für zukünftige Forschungsarbeiten.....	93
7.7	Empfehlungen für die Lichtplanung	94
8	Literaturverzeichnis.....	95
9	Anhang.....	100
9.1	Beleuchtungskennwerte.....	100
9.2	Helligkeitsbewertungen der ersten Befragung	103
9.3	Helligkeitsbewertungen der zweiten Befragung.....	106
9.4	Äquivalente Szenenleuchtdichten	107
10	Liste eigener Publikationen	109
11	Lebenslauf	110
12	Erklärung laut §9 PromO	112

1 Zusammenfassung

Die lichttechnischen Größen basieren auf dem relativen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für photopisches Sehen. Die Leuchtdichte L ist aus wahrnehmungsphysiologischer Sicht dabei die wichtigste lichttechnische Grundgröße, da sie am besten mit dem visuellen Helligkeitseindruck von Lichtquellen und materiellen Oberflächen korreliert. Es zeigt sich aber, dass die Leuchtdichte nicht mit der Helligkeitswahrnehmung übereinstimmt.

Die Ziele der Arbeit sind der Vergleich des Helligkeitseindrucks von Lichtquellen unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung, die Untersuchung der Abhängigkeit der Probandenwertung von lichttechnischen Kennzahlen der Beleuchtung, sowie die Prüfung der Anwendbarkeit verschiedener, bereits existierender Helligkeitsmodelle.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Testraum mit variabler Beleuchtung aufgebaut, der auch für Untersuchungen weiterer lichttechnischer Aspekte in der Innenraumbeleuchtung geeignet ist. In der hier beschriebenen Arbeit kamen Halogenglühlampen, sowie Leuchtdioden und Leuchtstofflampen mit jeweils zwei verschiedenen Farbtemperaturen (2700 K und 4000 K), also insgesamt fünf unterschiedliche Lichtquellen zum Einsatz. Die Probanden hatten unter der jeweiligen Beleuchtung die Helligkeit einer farblosen, weißen Wand zu bewerten, welche ihr gesamtes Gesichtsfeld ausfüllte. Insgesamt wurden 33 unterschiedliche Szenen mit den drei Lichtquellen, zwei Farbtemperaturen und mehreren Leuchtdichteniveaus in randomisierter Reihenfolge mehrfach von zwölf Probanden beurteilt.

Die Helligkeitswertung der Probanden war durch die Farbtemperatur und erwartungsgemäß durch die mittlere Leuchtdichte der Wand bestimmt. Um den gleichen Helligkeitseindruck der neutralweißen Beleuchtung mit 4000 K zu erreichen war für 2700 K eine um ein Viertel (25 %) höhere Leuchtdichte nötig. Es bedeutet auch, dass bei gleicher Leuchtdichte neutralweiße Szenen signifikant heller als warmweiße wahrgenommen wurden.

Die Art der Lichtquelle bzw. die spektrale Zusammensetzung des Lichts hatte keinen Einfluss auf die Bewertung. Damit hängt auch zusammen, dass die Farbwiedergabeeigenschaften der Lichtquellen bei der Bewertung der weißen Wand die Helligkeitswahrnehmung nicht beeinflusst haben. Dies muss nicht unbedingt für eine farbige Umgebung gelten, was in der Zukunft zu prüfen wäre.

Das Ziel wahrnehmungsgerechter Strahlungsbewertung ist, Effekte wie beispielsweise den Einfluss der Farbtemperatur, zu vermeiden. Es wurden daher diverse Helligkeitsmodelle getestet, die dies auf unterschiedliche Weise korrigieren sollen. Die beste Bewertung der Strahlung ermöglicht dabei das *SWS Lumens*-Modell von Fotios. Es wurde unter ähnlichen Untersuchungsbedingungen erstellt und basiert auf der Korrektur der photopischen Leuchtdichte durch das SWS/p -Verhältnis. Ob sich dieses Modell als besseres Maß zur Beurteilung der Helligkeit in der Allgemeinbeleuchtung gegenüber der Leuchtdichte durchsetzen könnte, muss sich in zukünftigen Studien zeigen.

Die vorherigen Erkenntnisse gelten für alle befragten Probanden gemeinsam. Die statistische Untersuchung der Helligkeitsbewertungen einzelner Probanden hat gezeigt, dass die Probanden in zwei Gruppen aufgeteilt werden können. Die eine Gruppe bewertete die Helligkeit unabhängig der Farbtemperatur. Diese Ergebnisse lassen sich gut mit der Leuchtdichte der Wand beschreiben. Diese Gruppe kann als achromatisch bezeichnet werden. Die Wertungen der zweiten Gruppe hängen stark mit der Farbe des Lichts zusammen. Szenen gleicher Leuchtdichte werden von diesen Probanden unterschiedlich hell bewertet, wenn deren Farbtemperatur unterschiedlich ist. Hier kann von einer chromatischen Gruppe gesprochen werden. Für die zukünftigen lichttechnischen Studien wäre es wichtig, die Probandenzusammensetzung auf solche Aspekte zu kontrollieren. Denn je nachdem welcher Probandentyp überwiegt, können bei gleichen Bedingungen unterschiedliche Erkenntnisse abgeleitet werden.

2 Einleitung

Der Mensch nimmt den größten Teil der Informationen über seine Umwelt durch das Auge auf. (Haubner, 1977) Licht ist dabei Voraussetzung und Medium des Sehens. Es schafft durch seine Intensität, seine Verteilung und seine Eigenschaften spezifische Bedingungen, die unsere Wahrnehmung beeinflussen. (Ganslandt, et al., 1992)

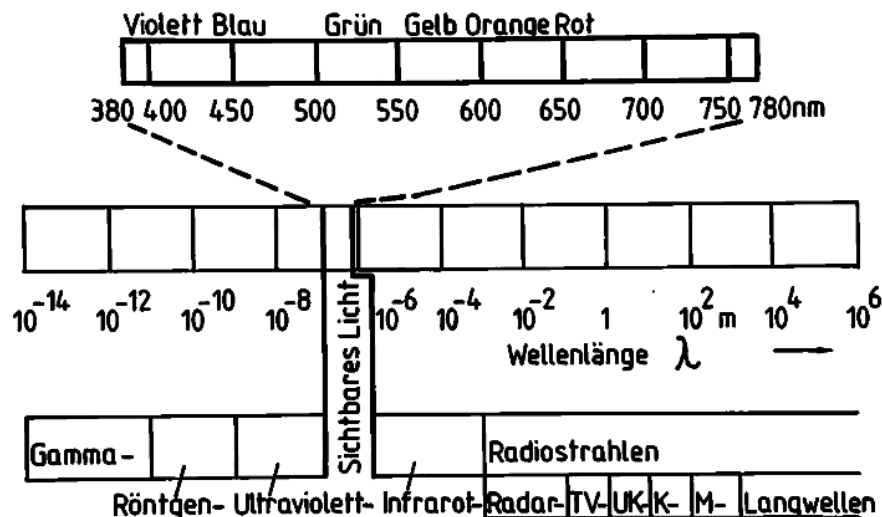


Abbildung 2.1 Spektrum der elektromagnetischen Wellen (Hentschel, 1994)

Nur den kleinen Abschnitt zwischen 380 nm und 780 nm auf der spektralen Skala der elektromagnetischen Wellen verstehen wir als sichtbares Licht (siehe Abbildung 2.1). Innerhalb dieses Bereichs liegen die Wellenlängen bzw. die Frequenzen, die in unserem Auge eine Sehempfindung auslösen und folglich den Bereich der sichtbaren Strahlung einschließlich der erfahrbaren Farben eingrenzen. (Bartenbach, et al., 2009; Hentschel, 1994)

Der Strahlungsfluss, der aus einer bestimmten Richtung in unser Auge gelangt, vermittelt uns den Eindruck einer gewissen Helligkeit der Strahlungsquelle. Der Begriff Helligkeit ist somit das Resultat einer Wechselwirkung zwischen Objektgegebenheit, d. h. der physikalischen Charakteristik einer Lichtquelle und/oder eines beleuchteten Gegenstands, und psychophysischen Bestimmungsgrößen auf Seiten des Beobachters. (Bartenbach, et al., 2009)

Das Resultat einer wellenlängenabhängigen Helligkeitsbewertung der physikalischen Strahlungsleistung ist die spektrale Hellempfindlichkeit des Auges. Diese ist für alle Farben unterschiedlich, daher versagt beim Licht eine ausschließlich physikalische Beschreibung der Strahlung. (Bartenbach, et al., 2009; Boyce, 2003)

Die CIE (Commission International de l'Eclairage) hat 1924 aufgrund experimenteller Untersuchungen den photometrischen Normalbeobachter mit einem relativen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für photopisches Sehen (Tagessehen) standardisiert. 1951 wurde die relative spektrale Hellempfindlichkeitskurve $V'(\lambda)$ für skotopisches Sehen (Nachtsehen) definiert.

In Abbildung 2.2 sind diese beiden Funktionen dargestellt. Für das Übergangsehen, dem mesopischen oder Dämmerungssehen, wurde je nach Literatur eine zwischen den beiden Funktionen liegende Kurve ermittelt. (Boyce, 2003; Hentschel, 1994; Bartenbach, et al., 2009)

Die spektrale Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ basiert auf der Arbeit von Gibson und Tyndall von 1923, die Daten eigener und diverser vorheriger Experimente zusammenfassten. Die Daten basieren auf Helligkeitsabgleichen von entweder gleichzeitig präsentierten Testlichtern auf einem geteilten Schirm oder aber in schneller Abfolge in einem Flimmerphotometer. Auf dieser Grundlage schlugen sie eine Empfindlichkeitskurve vor, die von der CIE mit einigen Änderungen übernommen wurde. (Boyce, 2003; Hardis, 2001)

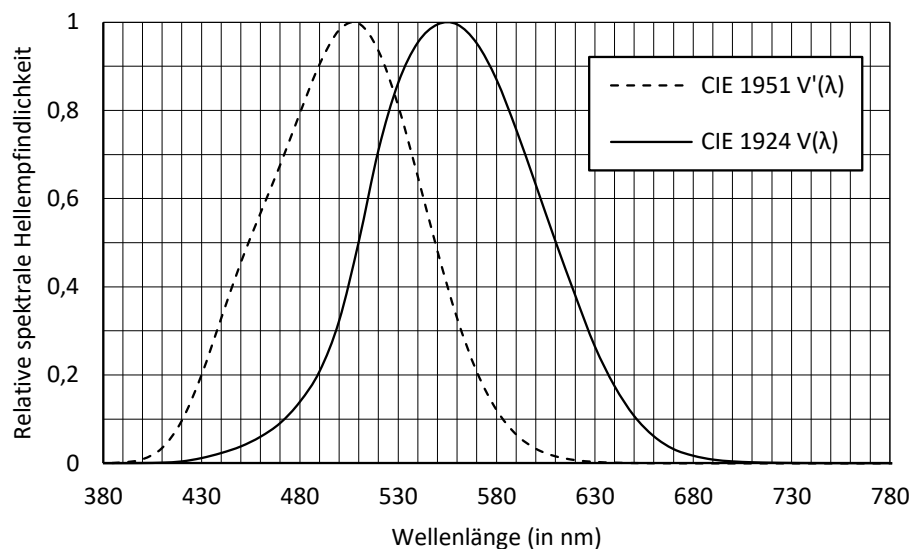


Abbildung 2.2 Kurven der relativen spektralen Hellempfindlichkeit für Tagessehen $V(\lambda)$ und Nachtsehen $V'(\lambda)$

Auf der relativen spektralen Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ von 1924 basiert das photometrische System und sofern nichts Gegenteiliges angegeben wird, bezieht sich jede Lichtmessung auf die Bewertung der physikalischen Strahlung gemäß dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ des photometrischen Normalbeobachters für Tagessehen. (Hentschel, 1994)

Der Lichtstrom Φ_v (in der Einheit Lumen (lm)) ist die gesamte, von einer Lichtquelle in alle Richtungen ausgehende Strahlungsleistung Φ_e (in der Einheit Watt (W)), gewichtet mit der Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ und multipliziert mit dem photometrischen Strahlungäquivalent 683 lm/W . (Bartenbach, et al., 2009)

Die Formel hierfür lautet

$$\Phi_v = 683 \text{ lm/W} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad 2.1$$

Aufgrund der in Formel 2.1 zum Ausdruck kommenden Additivität der Bewertung einer zusammengesetzten Strahlung wird dies als Additivitätstheorem bezeichnet. (Hentschel, 1994)

Die Lichtstärke I (in der Einheit Candela (cd)) ist eine richtungsabhängige Größe und ergibt sich aus dem Verhältnis eines Teillichtstroms in eine bestimmte Richtung und dem Raumwinkel Ω , in welchem dieser Lichtstrom abgestrahlt wird. (Bartenbach, et al., 2009)

Die Beleuchtungsstärke E (in der Einheit Lux (lx)), als Maß für die Lichtstromdichte, ist als das Verhältnis des auf eine Fläche fallenden Lichtstroms zur Größe dieser Fläche definiert. Dabei ist sie nicht an eine reale Oberfläche gebunden, sondern kann an jeder Stelle des Raums bestimmt werden. (Ganslandt, et al., 1992)

Die Leuchtdichte L (in cd/m^2) ist aus wahrnehmungsphysiologischer Sicht die wichtigste lichttechnische Grundgröße, da sie für den optisch-visuellen Helligkeitseindruck von Lichtquellen und materiellen Oberflächen steht. (Bartenbach, et al., 2009; Hentschel, 1994) Während die Beleuchtungsstärke den auf eine Fläche treffenden Lichtstrom erfasst, beschreibt die Leuchtdichte den von einer Fläche in einen Raumwinkel abgestrahlten Lichtstrom. Die Leuchtdichte bildet die Grundlage der wahrgenommenen Helligkeit. (Ganslandt, et al., 1992)

Idealerweise sollten zwei visuelle Reize mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung aber gleicher Leuchtdichte für einen Betrachter gleich hell erscheinen. Meist gibt es aber keine Übereinstimmung, da die $V(\lambda)$ -Funktion nur unter bestimmten Bedingungen gilt. (Bodman, 1992)

Die $V(\lambda)$ -Funktion wurde ursprünglich auf Grundlage bestimmter visueller Parameter festgelegt. Dazu gehören das photopische Niveau der Beleuchtung, ein kleines Sichtfeld (2° - 3°), ein spektral neutrales Umfeld und die zentrale Fixation. Diese Bedingungen liegen eher selten außerhalb eines Experiments vor, so dass die $V(\lambda)$ -Funktion normalerweise nicht den Zustand des Sehapparats im realen Leben beschreibt. (Fotios, et al., 1995) Eine Änderung der Größe des Reizes oder des Helligkeitsniveaus führt zu einer Änderung der spektralen Empfindlichkeit des visuellen Systems. (Boyce, 2003)

Daher verwundert es kaum, dass die $V(\lambda)$ -Funktion zur Vorhersage der Helligkeitswahrnehmung in der Innenraumbeleuchtung nicht geeignet ist, was seit der Festlegung des photometrischen Normalbeobachters in unzähligen Studien gezeigt wurde. (Fotios, 2001)

Dies hat Folgen für die Beleuchtungspraxis, denn bei der Planung der Beleuchtung in Innenräumen stützt man sich auf die in Normen angegebenen Empfehlungen und Grenzwerte, die natürlich auf $V(\lambda)$ -bewerteten lichttechnischen Größen basieren. Bei gleicher Leuchtdichte bzw. Be-

leuchtungsstärke würden Räume unterschiedlich hell erscheinen, wenn unterschiedliche Lichtquellen eingesetzt würden. Dies ist nicht nur ein ästhetisches Problem. Die nominell höhere Lichtausbeute (Lichtstrom bezogen auf die elektrische Leistung, angegeben in lm/W) nützt wenig, wenn der Raum dunkler im Vergleich zu einer weniger effizienten Lichtquelle erscheint.

3 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Helligkeitswahrnehmung unter möglichst realen Bedingungen, die für die Innenraumbeleuchtung, im Speziellen für die Bürobeleuchtung relevant sind.

Als Erstes war ein geeigneter Raum zu finden und aufzubauen, der den Anforderungen an ein kleines Büro entspricht und nach Möglichkeit auch für andere Wahrnehmungsexperimente des Fachgebiets Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt zur Verfügung stehen sollte. Daher war eine möglichst flexible Beleuchtungsanlage aufzubauen, die die Erprobung unterschiedlicher Beleuchtungskonzepte (beispielsweise gerichtetes und schattenarmes, gestreutes Licht) mit unterschiedlichen Lichtquellen ermöglicht.

Ebenso sollte das Beleuchtungsniveau den Mindestanforderungen der gültigen Normen, wie beispielsweise (DIN EN 12464-1, 2011) oder (BGI 856, 2008), entsprechen.

Die Beleuchtung war mit unterschiedlichen Lichtquellen zu realisieren, die üblicherweise in der Innenraumbeleuchtung eingesetzt werden. Dazu gehören Leuchtstofflampen unterschiedlicher Farbtemperatur, sowie Leuchtdioden. Diese haben aufgrund technischer Fortschritte in den letzten Jahren immer größere Marktanteile erobert und werden vermutlich die Leuchtstofflampen als die Hauptlichtquelle in der Bürobeleuchtung ablösen. Allerdings sind sie aufgrund ihrer Neuheit bislang kaum untersucht worden. Die verwendeten Lichtquellen müssen ebenfalls bezüglich ihrer Farbqualität die oben genannten Normen erfüllen.

Auch Glühlampen sollen, um die Vergleichbarkeit mit historischen Studien herstellen zu können, verwendet werden, trotz ihrer aus energetischen Gründen vernachlässigbaren Verwendung in der heutigen professionellen Innenraumbeleuchtung.

Die Hauptaufgabe dieser Arbeit ist der Vergleich des Helligkeitseindrucks der eingesetzten Lichtquellen und die Untersuchung der Abhängigkeit der Probandenwertung von lichttechnischen Kennzahlen der Beleuchtung. Die Rahmenbedingungen hierfür sind

- die Bewertung großer, ausgedehnter Flächen;
- Einzelbewertung der Szenen, wie dies in der Realität in einem Raum der Fall ist (keine gleichzeitige Präsentation unterschiedlicher Lichtquellen);
- ausreichende Adaptationszeit, sowohl für die Helligkeits- als auch die chromatische Adaptation.

Des Weiteren sind die, im nächsten Abschnitt beschriebene Helligkeitsmodelle auf die gewonnenen Testdaten anzuwenden und ihre Anwendbarkeit in der Innenraumbeleuchtung aufgrund der gewonnenen Daten zu beurteilen.

4 Helligkeitsbewertung

Im folgenden Abschnitt werden die Bedingungen unter welchen die Hellempfindlichkeitskurve des photometrischen Normalbeobachters erstellt wurde und die möglichen Gründe für die Unterschiede zwischen der menschlichen Wahrnehmung und der Beschreibung der Helligkeit durch den Normalbeobachter erläutert. Es wird hier auf eine detaillierte Beschreibung der großen Mengen an Studien, die die Helligkeitswahrnehmung zum Thema haben, verzichtet und auf die vorhandenen Bibliographien und Reviews verwiesen. (CIE 78, 1988; Fotios, 2001; Marsden, 1969) Es werden Helligkeitsmodelle vorgestellt, die diese Abweichungen zu korrigieren versuchen. Zum Schluss wird auf die Skalierung der subjektiven Helligkeitswertung mit der Leuchtdichte eingegangen.

4.1 Photometrischer Normalbeobachter

Der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ wurde mit Hilfe von Helligkeitsabgleichen unterschiedlicher visueller Reize ermittelt. Dabei wird ein Testreiz von Probanden in seiner Intensität so verändert, dass er einem fest vorgegebenen Referenzreiz in seiner Helligkeit gleicht. Danach werden die physikalischen Strahldichten der beiden Reize gemessen und zu einander ins Verhältnis gesetzt. Abbildung 4.1 zeigt eine übliche Anordnung der Reize für einen Helligkeitsabgleich. (Bodman, 1992)

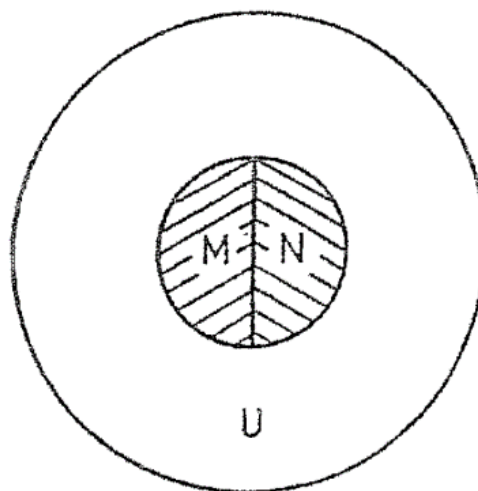


Abbildung 4.1 Reizanordnung für einen Helligkeitsabgleich. M – Testreiz; N – Referenzreiz und U – Umfeld
aus (Bodman, 1992)

Die CIE definierte den relativen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ unter folgenden Bedingungen (Bodman, 1992; Hardis, 2001):

- Feldgröße ($M + N$): ca. 2°
- Photopisches Helligkeitsniveau
- Umfeld U spektral neutral
- Zentrale (foveale) Fixation
- Normalsichtige Probanden
- Flimmerphotometrie und step-by-step Helligkeitsabgleich als Abgleichmethoden.

Da der Helligkeitsabgleich unterschiedlich farbiger Reize sehr schwierig ist, wurden verschiedene Methoden eingesetzt, die den Einfluss der Farbe auf ein Minimum reduzieren sollten.

Ein Flimmerphotometer vertauscht mit Hilfe eines rotierenden Glaskeils im Photometerfeld die Test- und Referenzreize mit einer Frequenz, bei der das Farbflimmern verschwindet und sich eine Mischfarbe einstellt. Das Helligkeitsflimmern hat dagegen eine höhere Verschmelzungsfrequenz und bleibt vorerst sichtbar. Mittels einer Lichtschwächungsmethode werden die beiden Reize so abgeglichen, dass auch das Helligkeitsflimmern verschwindet oder minimal wird. (Hentschel, 1994)

Beim step-by-step Helligkeitsabgleich werden nebeneinander zwei monochromatische Reize mit einem geringen Unterschied in der Wellenlänge dargestellt. Durch den geringen Unterschied in der Farbe können die Reize einfacher abgeglichen werden.

Innerhalb dieser Bedingungen kann die Leuchtdichte als Helligkeitsäquivalent verwendet werden, d. h. visuelle Reize erscheinen bei gleicher Leuchtdichte gleich hell.

1951 zeigte Judd, dass die $V(\lambda)$ -Funktion die kurzwellige Strahlung unterbewertet und schlug eine modifizierte Funktion vor. Diese wurde von der CIE als *Modified Photopic Observer* anerkannt. Lichtquellen mit einem breiten Spektrum, wie sie in der Innenraumbeleuchtung wegen der gewünschten hohen Farbwiedergabe verwendet werden, sind von dieser Änderung kaum betroffen. Deswegen und aufgrund der Verbreitung der $V(\lambda)$ -Funktion konnte sich der modifizierte Normalbeobachter nicht durchsetzen. (Boyce, 2003; Bodman, 1992; Hardis, 2001)

4.2 Gründe für Abweichungen in der Wahrnehmung

Die Abweichung von den oben genannten Bedingungen führt dazu, dass die Leuchtdichte nicht mehr mit der Helligkeitswahrnehmung übereinstimmt. Zwei Reize gleicher Leuchtdichte, aber unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung werden nicht gleich hell wahrgenommen. Es gibt mehrere Gründe für dieses Problem, die in der Physiologie des Menschen, speziell im Aufbau der Retina und der Verarbeitung visueller Signale zu suchen sind.

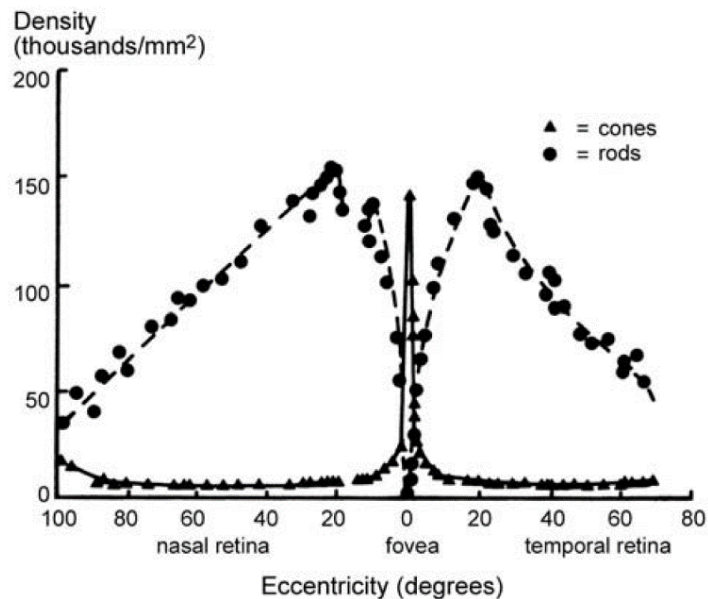


Abbildung 4.2 Dichte der Zapfen (cones) und Stäbchen (rods) in der Netzhaut (Boyce, 2003)

So beschreibt die $V(\lambda)$ -Funktion die Reaktion der Zapfen im Zentrum der Retina (Fovea) auf einen 2° -großen Reiz mit einer hohen Helligkeit. In der Innenraumbeleuchtung hat man es dagegen bei der Bewertung des Raumeindrucks mit großen Sichtfeldern zu tun, die das gesamte Blickfeld des Menschen ausfüllen.

Die in Abbildung 4.2 gezeigte Dichteverteilung der Zapfen und Stäbchen verdeutlicht, wie unterschiedlich die Sehzellen im Auge verteilt sind.

Die Zapfen, die für das Tag- und Farbsehen verantwortlich sind, sind hauptsächlich zentral an der visuellen Achse um die Fovea angeordnet und haben eine eher geringe Dichte auf der peripheren Retina. Die für das Nachtsehen verantwortlichen Stäbchen sind dagegen zentral kaum präsent, während sie in der Peripherie dominieren. Die Hellempfindlichkeit ist daher örtlich nicht konstant.

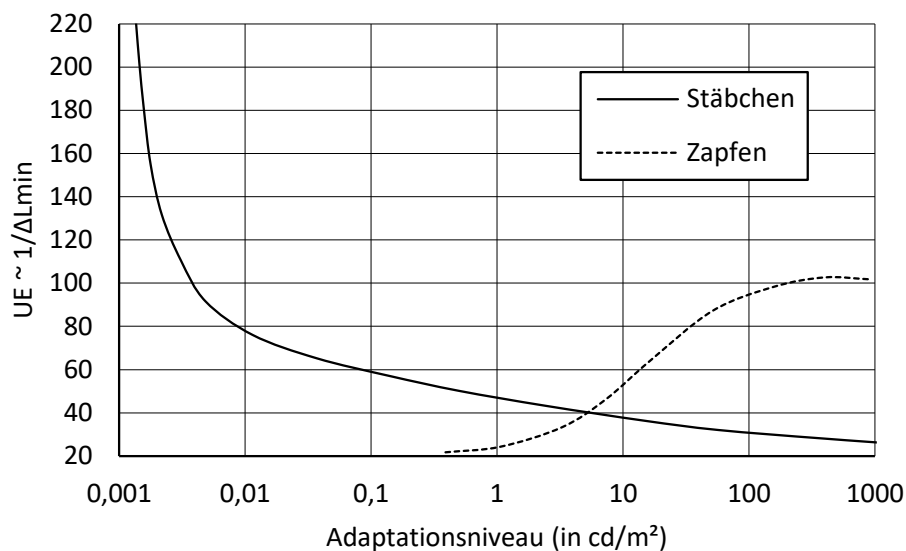


Abbildung 4.3 Unterschiedsempfindlichkeit der Sehzellen in Abhängigkeit vom Adaptationsniveau (Bartenbach, et al., 2009)

Auch wenn die Stäbchen die höchste Empfindlichkeit bei sehr niedrigen Leuchtdichten haben, sind sie bei photopischen Leuchtdichten nicht inaktiv, wie Abbildung 4.3 dies am Beispiel der Unterschiedsempfindlichkeit zeigt, und tragen bei großen Gesichtsfeldern wahrscheinlich ebenfalls zum Helligkeitseindruck bei. (Berman, et al., 1990; Berman, 1995)

Die spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen wird durch die $V'(\lambda)$ -Funktion des skotopischen Normalbeobachters mit einem Maximum bei 507 nm beschrieben (siehe Abbildung 2.2). Dadurch würden Spektren mit einem größeren Blauanteil heller erscheinen als solche mit einem geringeren, auch wenn die Leuchtdichte beider gleich wäre.

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass es drei Zapfenarten auf der Retina gibt, die S-, M- und L-Zapfen. Ihre Empfindlichkeitsmaxima liegen im Bereich der kurzen, mittleren oder langen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums (siehe Abbildung 4.4). Diese drei Zapfenarten sind ebenfalls nicht gleichmäßig über die Retina verteilt. Die M- und L-Zapfen sind in der Fovea konzentriert. Ihre Dichte nimmt mit zunehmendem Abstand von der Fovea kontinuierlich ab. Die S-Zapfen dagegen fehlen weitgehend im Zentrum der Fovea, erreichen ihre maximale Dichte kurz außerhalb von ihr und nehmen dann kontinuierlich ab. (Boyce, 2003)

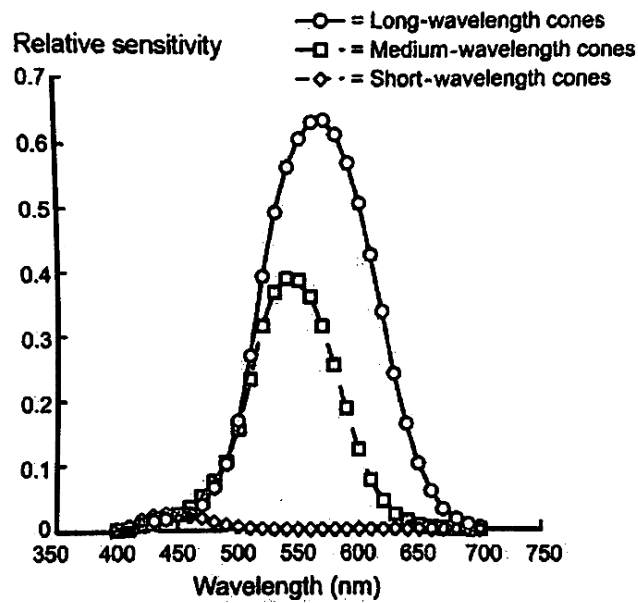


Abbildung 4.4 Relative spektrale Empfindlichkeitskurven für S-, M- und L-Zapfen nach Kaiser und Boynton (Boyce, 2003)

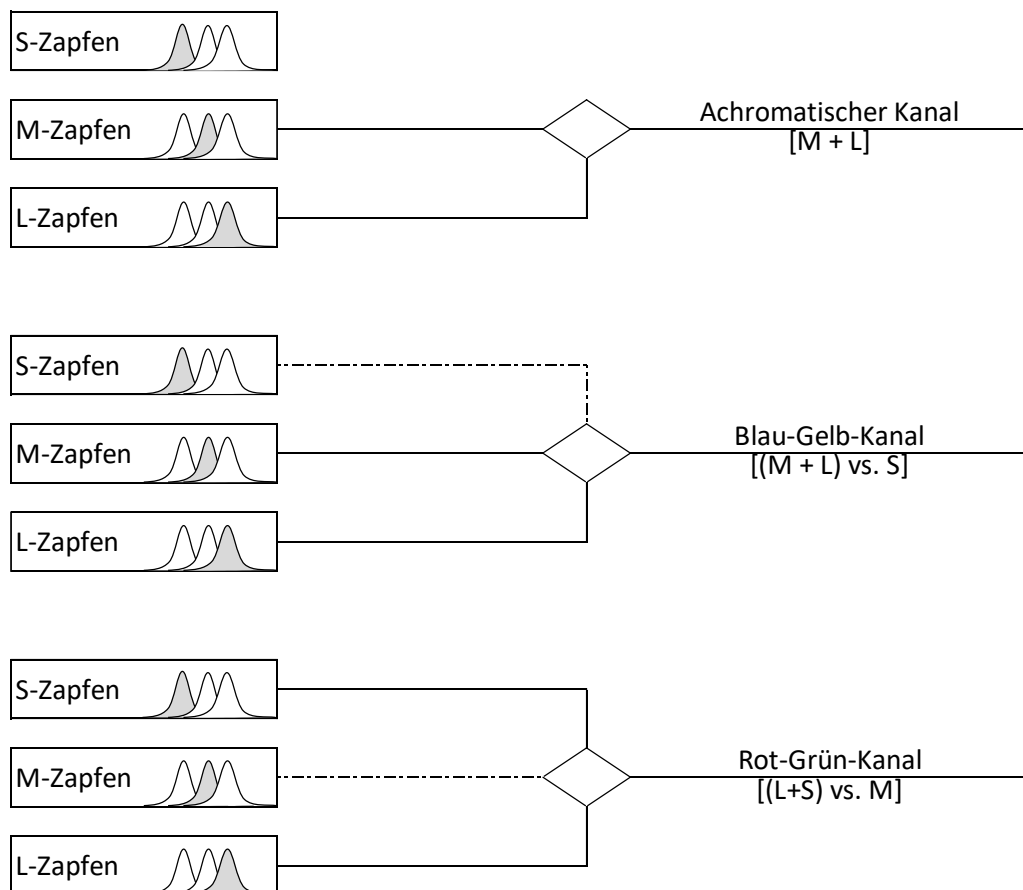


Abbildung 4.5 Organisation des Farbsehens mit drei Zapfentypen und deren Verschaltung zu einem achromatischen und zwei chromatischen Kanälen nach Sekular und Blake (Boyce, 2003)

Der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ wird in erster Linie durch den achromatischen Kanal (siehe Abbildung 4.5) definiert, da durch die Verwendung des 2°-Gesichtsfeldes und die Ausschaltung des Farbsehens durch ein Flimmerphotometer bei der Bestimmung der $V(\lambda)$ -Funktion die anderen Kanäle keine Rolle spielen. (Boyce, 2003; Berman, et al., 1990; Yaguchi, et al., 1993; Fotios, 2001) Es handelt sich also um eine Funktion, die ein sehr unnatürliches Sehen beschreibt.

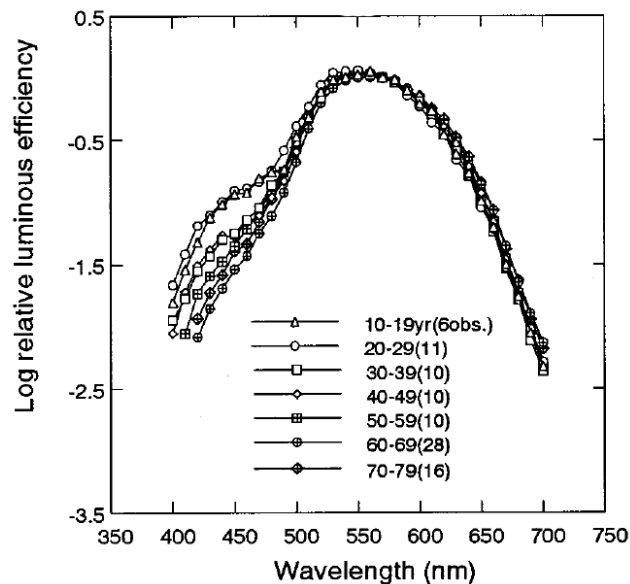


Abbildung 4.6 Gemittelte Hellempfindlichkeitskurven für verschiedene Altersstufen (Sagawa, et al., 2001)

Ein weiterer Faktor ist die Änderung der Hellempfindlichkeitskurve in Abhängigkeit vom Alter der Menschen. Es wurde eine sukzessive Verringerung der Empfindlichkeit vor allem im kurzwelligen Bereich, wie in der Abbildung 4.6 gezeigt, festgestellt. Dies wird auf die Veränderung der spektralen Transmission der Augenlinse zurückgeführt. (Sagawa, et al., 2001)

Abgesehen von solchen systematischen Abweichungen gibt es unvermeidbare Wahrnehmungsdifferenzen zwischen den Menschen. Die Abbildung 4.7 stellt die Streuung der Hellempfindlichkeitsgrade von unterschiedlichen Probanden dar. Daher ist es eher unwahrscheinlich, dass eine Bewertung mit der $V(\lambda)$ -Funktion der speziellen Wahrnehmung eines Probanden entspricht. (Boyce, 2003)

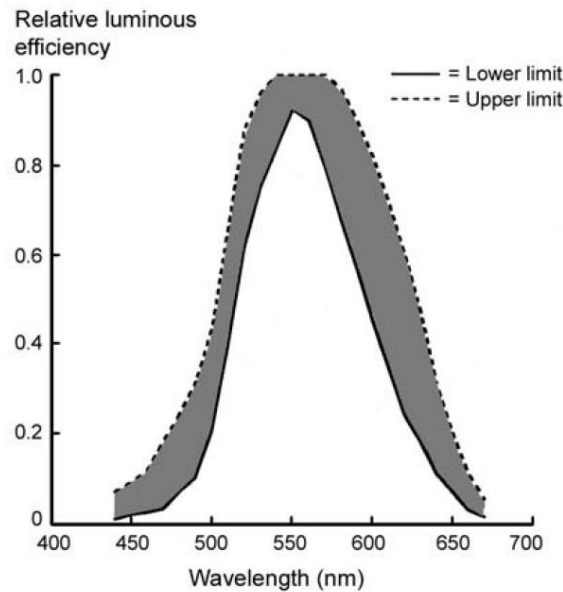


Abbildung 4.7 Streuung der Hellempfindlichkeitsgrade von 52 Probanden nach Judd und Wyszecki (Boyce, 2003)

Es gibt auch Hinweise, dass die chromatischen Kanäle bei verschiedenen Probanden unterschiedlich in die Helligkeitsbewertung eingehen können. Ikeda untersuchte mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse die interpersonelle Streuung von Probanden. Es wurden dabei vier Komponenten identifiziert, die den unterschiedlich starken Einfluss der Farbigkeit auf die Helligkeit beschreiben. Daraus kann bei einem Teil der Probanden eine achromatische Helligkeitswahrnehmung abgeleitet werden, während der andere Teil sehr inhomogen ist und unterschiedliche spektrale Bereiche in die Helligkeitsbewertung einfließen lässt. (Ikeda, et al., 1992)

4.3 Heterochromatischer Helligkeitsabgleich

Ersetzt man die Flimmerphotometrie durch einen direkten Helligkeitsabgleich von Reizen unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung, so ergibt sich eine andere Empfindlichkeitskurve. (CIE 75, 1988)

Diese Kurve, die $B_2(\lambda)$ -Funktion, die durch den direkten Helligkeitsabgleich für eine 2° -Feldgröße ermittelt wurde, ist im Vergleich zur $V(\lambda)$ - und $V_M(\lambda)$ -Funktion von Judd in Abbildung 4.8 dargestellt.

$B_2(\lambda)$ besitzt im Vergleich zu anderen Funktionen eine breite Charakteristik und drei Maxima, die auf drei Kanäle verweisen, sind erkennbar. Dies kommt zustande, da hier sowohl die achromatischen als auch die chromatischen Kanäle aktiv sind und sie nicht durch die Flimmerphotometrie ausgeschaltet werden.

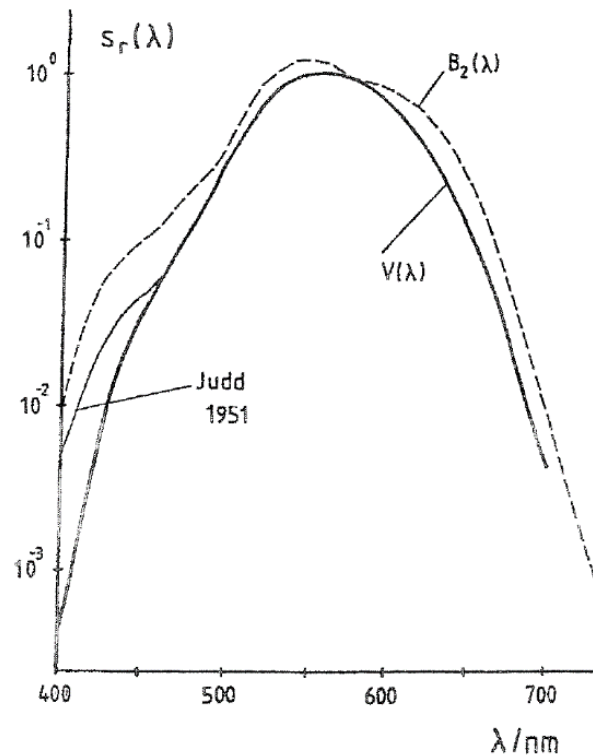


Abbildung 4.8 Relative spektrale Hellempfindlichkeitskurven $V(\lambda)$, $V_M(\lambda)$ von Judd und $B_2(\lambda)$ (Bodman, 1992)

Diese Funktion kann leider nicht auf Lichtquellen mit zusammengesetzten Spektren angewandt werden, da im Gegensatz zu $V(\lambda)$ die Additivität nicht vorhanden ist. (CIE 75, 1988) Daraus folgt, dass die einzelnen Wellenlängen nicht zuerst mit $B_2(\lambda)$ gewichtet und dann linear kombiniert werden können, wie dies bei der Gewichtung mit $V(\lambda)$ -Funktion der Fall ist. Damit ist nur der Vergleich monochromatischer Reize möglich.

Dies gilt genauso für die ebenfalls von der CIE vorgeschlagene $B_{10}(\lambda)$ -Funktion für eine Testfeldgröße von 10° . (CIE 75, 1988)

4.4 Äquivalente Leuchtdichte

Es ist offensichtlich, dass ein universelleres Helligkeitsmaß notwendig ist, das bei unterschiedlichen Sehbedingungen zuverlässig ist und auf bestehenden Systemen der Photometrie und der Farbmeterik aufbaut. Hierfür wurde das Konzept einer äquivalenten Leuchtdichte L_{eq} vorgeschlagen. Dieses Maß wurde zunächst für den mesopischen Bereich verwendet, um den Übergang zwischen dem photopischen und skotopischen Bereichen des Sehens zu modellieren. (Bodman, 1992)

Nach einem Helligkeitsabgleich entspricht die äquivalente Leuchtdichte des Testreizes M (siehe Abbildung 4.1) der $V(\lambda)$ -gewichteten Leuchtdichte L des Referenzreizes N :

$$L_{eq}(M) = L(N)$$

4.1

In der Vergangenheit wurden diverse Modelle diskutiert, um die äquivalente Leuchtdichte $L_{eq}(M)$ auf bestehende lichttechnische bzw. farbmetrische Größen des Reizes N zu beziehen.

Einem Beschluss der CIE entsprechend bezieht sich die Bezeichnung äquivalente Leuchtdichte L_{eq} auf einen monochromatischen Reiz mit einer Wellenlänge von 555 nm. Bei einem anderen Referenzreiz ist die Verwendung von „system equivalent luminance“ L_{seq} empfohlen. (CIE 141, 2001)

Die CIE hat mehrere technische Komitees mit der Literatursichtung und Erarbeitung von Modellen betraut. Daher werden im Rahmen dieser Einführung keine einzelnen Studien aufgeführt, sondern auf die Bibliographie der CIE zu diesem Thema verwiesen. (CIE 78, 1988)

Es wurden von der CIE folgende Systeme, die auf dem direkten heterochromatischen Abgleich basieren, zur weiteren Begutachtung und Überprüfung (CIE 141, 2001) ausgewählt:

- 2°-basierte Systeme
 - Ware-Cowan (1983)
 - Guth (1980)
 - Yaguchi-Ikeda (1984)
 - Nakano (1992)
- 10°-basierte Systeme
 - Palmer 1st (1968)
 - Palmer 2nd (1981)
 - Sagawa-Takeichi (1992)
 - Nakano-Ikeda (1992)
 - Kokoschka-Bodmann (1991)
 - Trezona (1989)

Ware und Cowan beschäftigten sich mit dem Verhältnis von Helligkeitswahrnehmung und der Leuchtdichte. Sie fassten 29 verschiedene Studien mit heterochromatischen Helligkeitsabgleichen bei kleinen Testfeldern (unter 2°) zusammen und entwickelten den Korrekturfaktor c , der auf den Farbwertanteilen x, y der bewerteten Lichtquelle basiert. (CIE 141, 2001; Boyce, 2003)

Die Gleichungen hierzu lauten

$$L_{seq} = L \cdot 10^c \quad 4.2$$

$$c = 0,256 - 0,184y - 2,527xy + 4,656x^3y + 4,657xy^4 \text{ für } y > 0,02 \quad 4.3$$

D. h. bei gleicher Leuchtdichte würden Lichtquellen mit einem höheren Korrekturfaktor heller erscheinen.

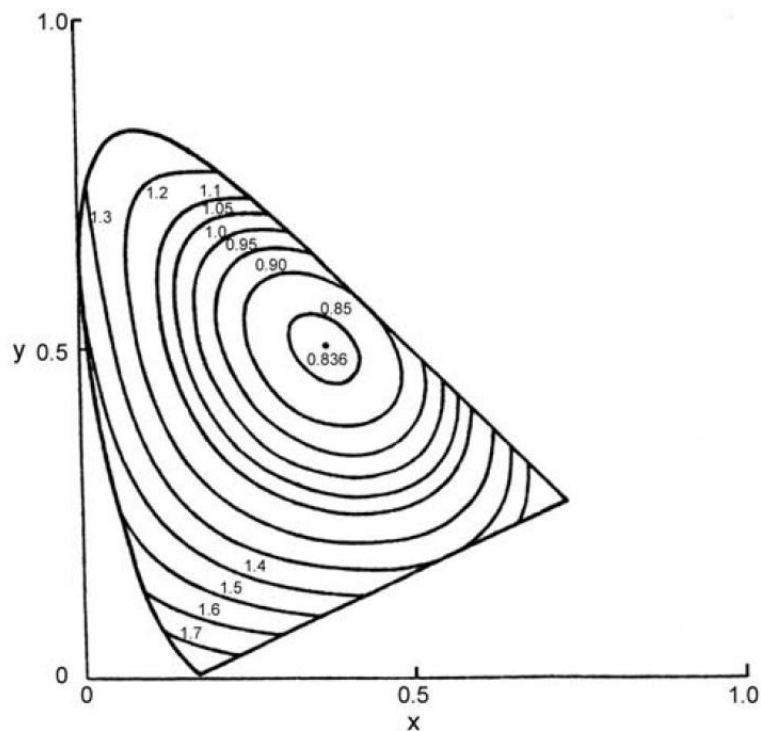


Abbildung 4.9 Iso-Linien für konstanten 10^c -Faktor eingezeichnet im CIE 1931 x,y -Farbdiagramm (Boyce, 2003)

Abbildung 4.9 zeigt die Isolinien für den Umrechnungsfaktor 10^c zwischen der äquivalenten und der photopischen Leuchtdichte, basierend auf der Gleichung 4.3 von Ware und Cowan. Die Helligkeit, eine gleiche Leuchtdichte vorausgesetzt, steigt demnach, je weiter man sich von gelben Farben in Richtung der gesättigten blauen, grünen und roten Töne entfernt. Daraus lässt sich schließen, dass weiße Lichtquellen mit höherer Farbtemperatur heller erscheinen als warmweiße Lichtquellen. (Boyce, 2003)

Das Ware-Cowan-Modell ist für vorwiegend kleine Sichtfelder bestimmt, wo das Zapfensehen dominiert. Es basiert auf empirischen Gleichungen und hat keinen Bezug zu physiologischen Prozessen. (CIE 141, 2001)

Das Modell von **Guth** basiert auf dem Konzept der „vector luminance“, das von Guth und seinen Kollegen im Rahmen ihrer Theorie des Farbensehens eingeführt wurde. Dieses verwendet die Farbwerte X' , Y' und Z' , die auf der $V_M(\lambda)$ von Judd basieren, und transformiert sie zu A (achromatische Komponente), T (tritanopische, also blaublinde Farbkomponente) und D (deuteranopische, also grünblinde Farbkomponente). Die äquivalente Leuchtdichte wird mit der folgenden Gleichung errechnet:

$$L_{seq} = \sqrt{A^2 + T^2 + D^2} \quad 4.4$$

Das **Yaguchi-Ikeda**-System stellt eine Modifikation des Systems von Guth dar und führt neue Faktoren C_1 , C_2 für die chromatischen Kanäle ein, die ebenfalls aus den Farbwerten X' , Y' und Z' , die auf der $V_M(\lambda)$ von Judd basieren, errechnet werden. Die äquivalente Leuchtdichte wird danach numerisch aus der Gleichung 4.5 bestimmt.

$$\left(\frac{A}{L_{seq}}\right)^2 + \left(\frac{C_1}{L_{seq}}\right)^{1,28} + \left(\frac{C_2}{L_{seq}}\right)^{0,72} = 1 \quad 4.5$$

Nakano modelliert die physiologischen Mechanismen in der menschlichen Helligkeitswahrnehmung und kalkuliert diese in mehreren Stufen. In seinem Modell verwendet Nakano die photopische Leuchtdichte L , die auf $V'(\lambda)$ -basierte skotopische Leuchtdichte L' , sowie die x , y -Farbkoordinaten von 1931. Das Modell korrigiert die photopische Leuchtdichte, analog dem Ware-Cowan-System, mit einem Faktor c .

$$L_{seq} = L \cdot 10^c \quad 4.6$$

Der Faktor c wird mit Hilfe einer photopischen und einer skotopischen Komponente errechnet. Die photopische Komponente basiert auf den Farbwertanteilen x und y , der skotopische Faktor auf dem Verhältnis von skotopischer zu photopischer Leuchtdichte L'/L . Da das Formelwerk hier umfangreich ist, wird hier auf Abbildung 4.10 und auf (CIE 141, 2001) verwiesen.

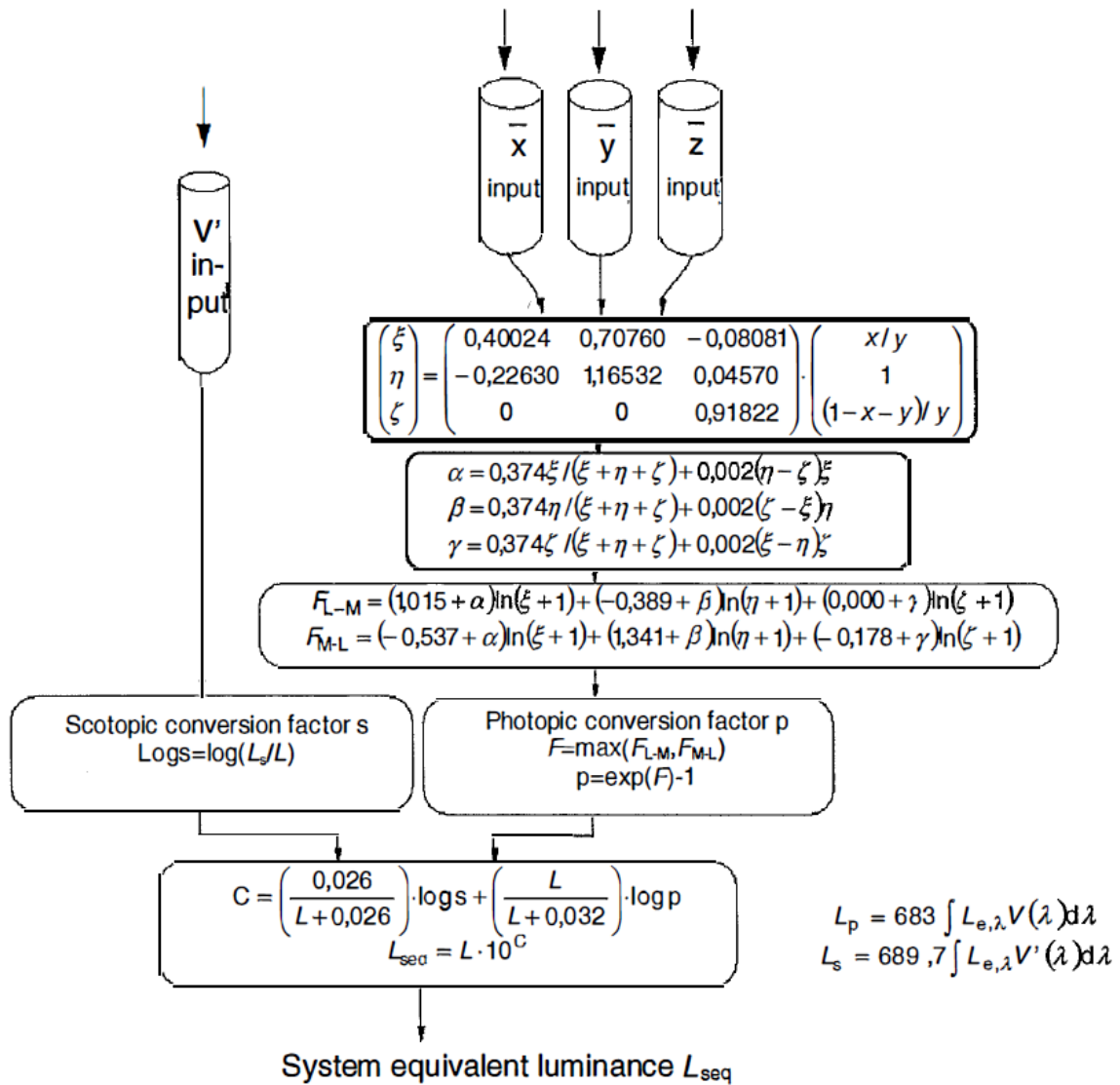


Abbildung 4.10 Kalkulation der äquivalenten Leuchtdichte nach Nakano (CIE 141, 2001)

Die beiden Modelle von **Palmer** beschreiben den Übergang zwischen der skotopischen und der photopischen Leuchtdichte und sind daher zuerst für die Mesopie vorgeschlagen worden. Palmer leitet sein System aus der Kombination von skotopischer Leuchtdichte L' und der y_{10} -Funktion aus dem CIE 1964-Farbsystem für 10° -Sichtfelder, die die $V(\lambda)$ -Funktion ersetzt, her. Das erste System wird durch die lineare Gleichung 4.7 repräsentiert.

$$L_{seq} = aL' + (1 - a)L_{10} \quad 4.7$$

$$a = \frac{M}{L_{10} + M} \text{ mit } M = 0,04 \text{ cd/m}^2 \quad 4.8$$

Die äquivalente Leuchtdichte L_{seq} ist somit der gewichtete Mittelwert aus der skotopischen und der photopischen „Weitwinkel“-Leuchtdichte. Der Gewichtungsfaktor a , Adaptationskoeffizient genannt, hängt von der photopischen Leuchtdichte ab.

Palmer überarbeitete 1981 sein Modell und ersetzte die lineare Gleichung durch eine nichtlineare Kombination (siehe Gleichung 4.9 mit $M = 0,06 \text{ cd/m}^2$) von L' und L_{10} , die seine Daten besser widerspiegelte.

$$L_{seq} = (ML')^{0,5} + L_{10} + \frac{M}{2} - \left(M \left((ML')^{0,5} + L_{10} + \frac{M}{4} \right) \right)^{0,5} \quad 4.9$$

Die Modelle von Palmer beschreiben hauptsächlich den Einfluss der Stäbchen auf die Helligkeitswahrnehmung und ignorieren den Beitrag der chromatischen Kanäle.

Sagawa und Takeichi betrachten mit ihrem System den photopischen und skotopischen Beitrag zum Helligkeitseindruck und kalkulieren zunächst die äquivalenten Leuchtdichten $L_{seq,p}$ und $L_{seq,s}$, um danach die L_{seq} als gewichteten Mittelwert zwischen beiden zu berechnen.

$$L_{seq} = L_{seq,s}^a \cdot L_{seq,p}^{1-a} \quad 4.10$$

Die Berechnung des photopischen Anteils basiert auf dem Modell von Ware und Cowan mit der Anpassung des Koeffizienten c (siehe Gleichung 4.3) an das 10° -Gesichtsfeld.

$$L_{seq,p} = L \cdot 10^{c'} \quad 4.11$$

$$c' = 2(c + 0,047) \quad 4.12$$

Der skotopische Anteil berechnet sich mit der Gleichung 4.13.

$$L_{seq,s} = 1,84 L' \quad 4.13$$

Da der Adaptationskoeffizient a eine Funktion der äquivalenten Leuchtdichte L_{seq} ist, bietet sich entweder ein iteratives oder ein graphisches Verfahren als Lösung an. Die graphische Bestimmung der äquivalenten Leuchtdichte wird in Abbildung 4.11 dargestellt.

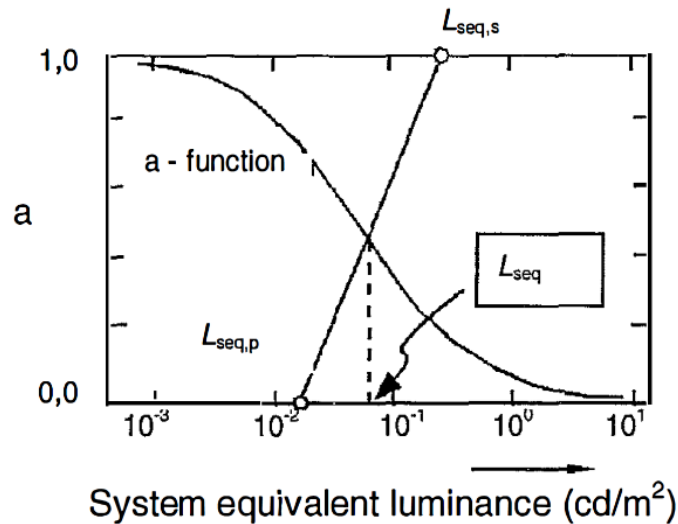


Abbildung 4.11 Graphische Bestimmung der äquivalenten Leuchtdichte L_{seq} aus den photopischen und skotopischen Anteilen $L_{seq,p}$ und $L_{seq,s}$ nach dem Modell von Sagawa und Takeichi (CIE 141, 2001)

Das Modell von **Nakano und Ikeda** für 10°-Gesichtsfelder ergänzt das 2°-System von Nakano, welches zuvor bereits vorgestellt wurde. Dabei wird die $V(\lambda)$ -basierte photopische Leuchtdichte durch die „Weitwinkel“-Leuchtdichte ersetzt, die auf der $y_{10}(\lambda)$ -Funktion basiert. Zusätzlich werden die Umrechnungsfaktoren angepasst.

Das **Kokoschka-Bodmann**-System basiert auf der linearen Kombination der Farbwerte X_{10} , Y_{10} und Z_{10} des CIE 1964 Farbraums für 10° und der skotopischen Leuchtdichte.

$$L_{est} = F_x X_{10} + F_y Y_{10} + F_z Z_{10} + F_s L' \quad 4.14$$

Die einzelnen Gewichtungsfaktoren aus Gleichung 4.14 hängen von der äquivalenten Leuchtdichte L_{seq} ab. Daher ist dieses Modell ebenfalls auf iterative Berechnungen angewiesen.

$$L_{seq} = f \cdot L_{est} \quad 4.15$$

Der Faktor f basiert auf dem Adaptationskoeffizienten von Ikeda und Ashizawa und dem Korrekturfaktor c von Ware und Cowan, ersetzt aber die CIE 1931 x, y -Farbkoordinaten durch x_{10}, y_{10} aus dem CIE 1964 Farbraum für große Gesichtsfelder.

Trezonas System greift das Konzept der tetrachromatischen Farbmatrik auf, das von ihr vorgeschlagen wurde, um das Problem der Nichtadditivität beim direkten heterochromatischen Helligkeitsabgleich zu lösen. (Trezona, 1973)

Da das Formelwerk hierbei umfangreich ist, wird hier auf Abbildung 4.12 und auf (CIE 141, 2001) verwiesen.

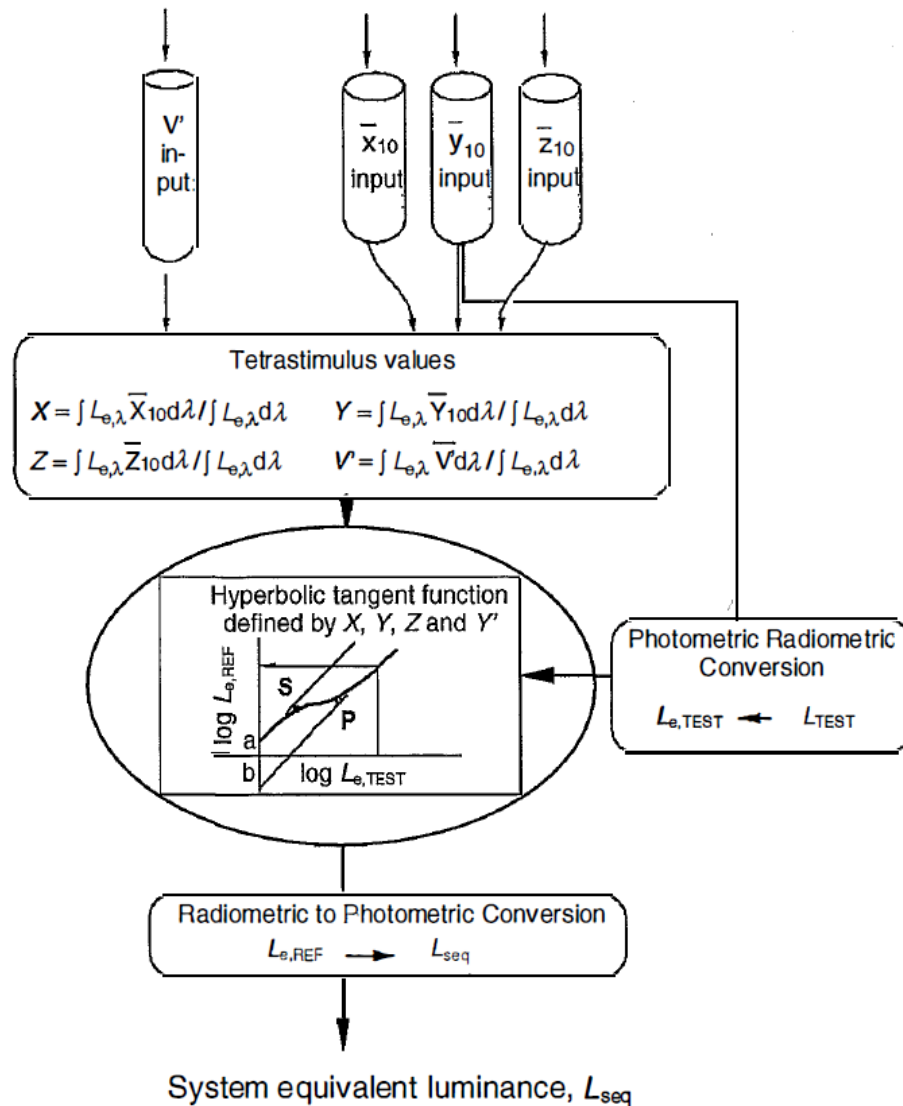
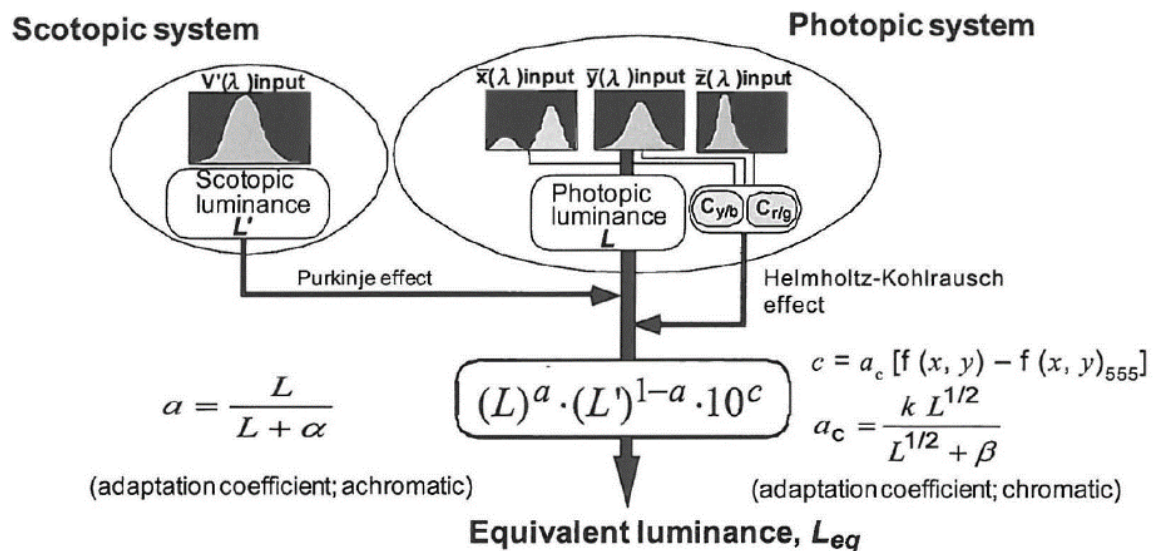


Abbildung 4.12 Berechnung der äquivalenten Leuchtdichte nach Trezona (CIE 141, 2001)

Die CIE hat 2011 auf Grundlage der hier vorgestellten Arbeiten und des Vergleichs verschiedener Helligkeitsmodelle das **CIE Supplementär-Photometriesystem** verabschiedet, „welches Lichter hinsichtlich vergleichbarer Helligkeitsverhältnisse bei beliebigem Niveau bewertet“. (CIE 200, 2011) Dieses System soll nicht den photometrischen Normalbeobachter ersetzen, sondern die Schätzung der Helligkeitswahrnehmung dort erleichtern, wo das aktuelle System unzureichend ist.



Parameters:

$$\alpha = 0,05 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}; \quad \beta = 2,24 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}; \quad k = 1,3;$$

$$f(x, y): \text{ see eqn. (5) (Nakano et al., 1999); } f(x, y)_{555} = 0,078$$

Abbildung 4.13 Berechnung der äquivalenten Leuchtdichte nach dem CIE Supplementär-Photometriesystem (CIE 200, 2011)

Abbildung 4.13 fasst das verabschiedete System zusammen. Das Modell basiert auf der möglichen physiologischen Signalverarbeitung und behandelt die beiden Hauptursachen für den Unterschied zwischen der Helligkeitswahrnehmung und der Leuchtdichte: den Beitrag des chromatischen Kanals und der Stäbchen. Das System verwendet die photopische und skotopische Leuchtdichte L und L' , sowie die CIE 1931 x, y -Farbkoordinaten für 2°-Gesichtsfelder. Die 10°-Systeme werden bewusst nicht verwendet, auch wenn sie in bestimmten Fällen besser geeignet scheinen, da die oben genannten Größen eine größere Verbreitung genießen und die Licht- und Farbmessgeräte hauptsächlich mit den 2°-Funktionen entwickelt sind. (CIE 200, 2011)

Die zusammengefassten Modelle sind nicht alle für die Vorhersage von photopischen Helligkeitsabgleichen geeignet. Palmer z.B. verwendet ausschließlich eine Kombination der skotopischen Leuchtdichte und der Leuchtdichte bewertet nach dem 10° Gesichtsfeld (CIE 1964 $y_{10}(\lambda)$), wodurch ausschließlich das Leuchtdichteniveau in die wahrgenommene Helligkeit mit einbezogen wird. Andere Systeme wiederum – wie z.B. Guth – entstammen eigentlich dem photopischen

Bereich und wurden um den mesopischen Bereich erweitert. Rein von der Konzeption her werden die folgenden Modelle als geeignet erachtet:

Ware-Cowan nutzt eine chromatische Korrektur der wahrgenommenen Helligkeit. Die Daten für die Korrektur entstammen zwar ausschließlich Publikationen, welche sich mit heterochromatischen Helligkeitsabgleichen im 2°-Gesichtsfeld befassen, jedoch ist diese Korrektur nichtlinear zur Farbtemperatur, was den Resultaten von Boyce, Berman und Ju gerecht wird. **Sagawa** verwendet im photopischen Bereich die gleiche Korrektur. Sie findet Anwendung im photopischen Anteil der äquivalenten Leuchtdichte.

Guth sowie Yagushi implementierten zwei chromatische Kanäle wodurch die spektrale Abhängigkeit der Helligkeit abbildbar wird. Ebenfalls nutzt das Modell von **Nakano** chromatische Kanäle (hier Opponentkanäle), aus dem Modell von **Nakano-Ikeda** (siehe auch (CIE 200, 2011)). Zudem werden in ihrem Ansatz die Spektralbewertungskurven für das 10°-Gesichtsfeld angewandt, welche rein physiologisch eher zum Versuchsaufbau passen.

Die gilt zwar auch für Kokoschka-Bodmann und Trezona, jedoch erfolgt hier die chromatische Korrektur explizit für den Übergang vom skotopischen Sehen zum photopischen Sehen, weshalb die chromatischen Beiträge zu steigenden Leuchtdichten hin asymptotisch gegen Null gehen.

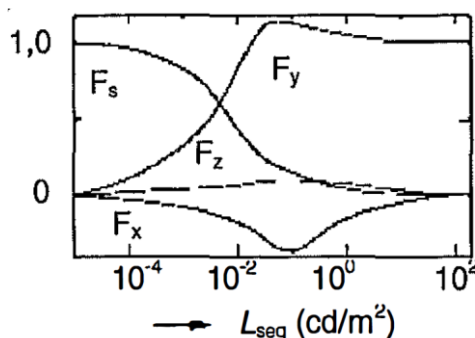


Abbildung 4.14 Verlauf der achromatischen und chromatischen Beiträge zur Helligkeit in Abhängigkeit der äquivalenten Leuchtdichte bei Kokoschka-Bodmann (CIE 141, 2001)

4.5 Weitere Modelle

Zwei weitere Vorschläge, die nicht in die Berichte der CIE aufgenommen wurden, sollen hier erörtert werden. Diese Arbeiten untersuchten vor allem die Wahrnehmung der in der Praxis häufig verwendeten weißen Lichtquellen, die in der Innen- und Außenbeleuchtung eingesetzt werden. Sie beziehen sich auf große Gesichtsfelder und vergleichen die Lichtquellen bei realistischeren Bedingungen als die 2°-großen Testfelder.

So stellte Berman bei Helligkeitsuntersuchungen in Testräumen, in welchen die Versuchspersonen die Helligkeit der kompletten Wand zu beurteilen hatten (siehe Abbildung 4.15) fest, dass Lichtquellen mit einer höheren Farbtemperatur (kaltweiß) heller bewertet werden, als Lichtquellen mit einem wärmeren Weißton. Die Diskrepanz zwischen der Helligkeitswertung durch

Probanden und der Leuchtdichte ist höher als dies durch die Korrektur der $V(\lambda)$ -Funktion von Judd oder die Korrektur von Ware-Cowan auf Grund des Farbortes erklärbar wäre. Er führte dies auf den Beitrag der Stäbchen zum Helligkeitseindruck zurück. (Berman, 1995)

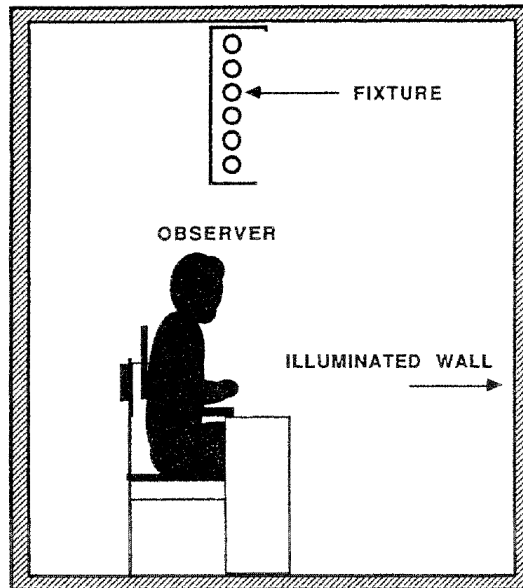


Abbildung 4.15 Skizze des Versuchsaufbaus von Berman (Berman, et al., 1990)

Berman versuchte nicht den Übergang zwischen dem photopischen und skotopischen Sehen zu modellieren, wie beispielsweise Palmer dies getan hat (siehe Abschnitt 4.4), sondern sah das „scotopic photopic ratio“ S/P der Lichtquelle als das geeignete Maß zur Korrektur der Leuchtdichte. Die Größen S und P entsprechen dabei bei Berman der skotopischen und photopischen Leuchtdichte L' und L . Er führt dabei „Brightness Lumens“ als eine neue Größe ein (siehe Gleichung 4.16), um die Helligkeit der Lichtquellen zu beschreiben. (Berman, 1995)

$$\text{Brightness Lumens} = P \cdot \left(\frac{S}{P} \right)^{0,5} \quad 4.16$$

Fotios schlug auf Grund der physiologischen Erkenntnisse (vgl. (Mollon, et al., 1990)) und eigener Helligkeitsbefragungen den Austausch der skotopischen Leuchtdichte S bzw. L' durch den Beitrag der S-Zapfen vor, die ähnlich den Stäbchen im kurzwelligen, blauen Bereich lichtempfindlich sind. Er nennt die neue Größe dann entsprechend „SWS Lumens“ („short wavelength sensitive“). (Fotios, et al., 1998)

Für die Empfindlichkeit der S-Zapfen gilt nach seinem Modell (unter der Verwendung von $s(\lambda)$)

$$\text{SWS} = 683 \int L_e(\lambda) s(\lambda) d\lambda \quad 4.17$$

$$\text{SWS Lumens} = P \left(\frac{\text{SWS}}{P} \right)^{0,24} \quad 4.18$$

Fotios vertritt die Meinung, dass das SWS Lumens-Modell besser die vorhandenen experimentellen Daten beschreibt und den physiologischen Erkenntnissen gerechter wird. (Fotios, et al., 1998)

In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass die Bezeichnung „Lumens“ etwas unglücklich gewählt wurde. „Lumens“ sollen nicht mit der lichttechnischen Einheit für den Lichtstrom – Lumen – verwechselt werden. Sie beziehen sich nicht, wie der Name suggerieren könnte, auf den Lichtstrom, sondern wie die anderen Helligkeitsmodelle auch auf die Leuchtdichte.

4.6 Helligkeitsskalierung

Die Erforschung der Beziehung zwischen der Leuchtdichte und der wahrgenommenen Helligkeit hat eine lange Geschichte, beginnend mit Fechner (1860) und dem Erreichen ihres Höhepunkts in den Arbeiten von Stevens (1961). Über die Jahre hinweg hat Stevens gezeigt, dass zwischen diversen Sinnen und den entsprechenden Stimuli eindeutige Beziehungen bestehen. (Boyce, 2003)

Stevens stellte fest, dass die Empfindung ψ proportional zum Reiz S potenziert mit n ist. (Stevens, 1957)

$$\psi = kS^n \quad 4.19$$

Die Empfindung ψ und der Reiz S können in unserem Fall mit der wahrgenommenen Helligkeit B und der Leuchtdichte L in cd/m^2 ersetzt werden. (Boyce, 2003) Für die Empfindung der Helligkeit gibt Stevens für den Exponenten n Werte zwischen 0,3 und 0,5 an. (Stevens, 1957)

Eine größere Übersicht der Versuche über den Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte und der wahrgenommenen Helligkeit findet sich bei Marsden. Er fasste dabei unterschiedliche Experimente zur Helligkeitsskalierung zusammen und wertete diese auf Grundlage der in Gleichung 4.19 gegebenen Beziehung aus. Diese schien ihm, auch auf Grundlage der physiologischen Untersuchungen an Nerven, am besten geeignet. (Marsden, 1969)

Bei seinen Untersuchungen fand er heraus, dass der Exponent n von der Größe des Testfelds, der Umfeldleuchtdichte, der Dauer der Präsentation des Reizes, des Adaptationszustands und der Farbe des Reizes abhängt.

Die Helligkeitsskalen, die aufgrund der direkten numerischen Schätzung gewonnen wurden, eignen sich am besten für die Nutzung in der Innenraumbeleuchtung.

Der Exponent n nimmt hier je nach Bedingungen einen Wert zwischen 0,15 und 0,59 an, wobei die meisten um 0,3 angegeben sind.

Bodman und La Toison nutzten das Modell von Haubner um allgemein die Helligkeitswahrnehmung in komplexen Szenerien vorhersagen zu können. (Bodman, et al., 1994) Die Gleichung, die Haubner in seiner Promotionsschrift entwickelte, lautet (Haubner, 1977)

$$B = cL_t^n - B_0 \text{ mit } B_0 = c(s_0 + s_1L_u^n) \quad 4.20$$

B ist dabei die Helligkeit (gesetzt auf 100 für $L_t = L_u = 300 \text{ cd/m}^2$), L_t die Leuchtdichte des Testfelds, L_u die Leuchtdichte des gleichmäßigen Umfelds, der Exponent $n = 0,31$ und c, s_0, s_1 sind Konstanten, die von der Größe des Testfelds abhängen.

Die Gleichung reduziert sich sowohl für $L_t \gg L_u$ als auch für $L_t = L_u$ mit entsprechender Anpassung des Koeffizienten c , um die Skalierung von $B = 100$ bei 300 cd/m^2 beizubehalten, ungefähr auf die Formel 4.19.

4.7 Helligkeitswahrnehmung großer Gesichtsfelder

Im Abschnitt 4.5 wurden die Modelle von Berman und Fotios vorgestellt, die auf Grundlage von Experimenten mit größeren Gesichtsfeldern, also größer als 10° , und unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung der Beleuchtung ermittelt wurden. In diesem Abschnitt sollen Studien detaillierter vorgestellt werden, die sich mit diesem Thema befassen haben.

1954 publizierte Harrington die Ergebnisse seiner Versuche zur Helligkeitswahrnehmung unterschiedlicher Farbtemperaturen. Die Probanden glichen die Helligkeit von zwei unterschiedlich beleuchteten Hälften auf einem Schirm ab, der ein Gesichtsfeld von $15^\circ \times 20^\circ$ ausfüllte. Auf den Schirm wurde Licht mit 5380, 5620 und 6260 K projiziert, das spektral annähernd der Strahlung eines schwarzen Strahlers mit der entsprechenden Temperatur entsprach. Nach dem Abgleich wurden die beiden Schirmhälften mit einer Photozelle gemessen und ins Verhältnis gesetzt. Die Beleuchtungsstärke am Schirm betrug während der Versuche ca. 8-10 ft-c bzw. 86-107 lx. (Harrington, 1954)

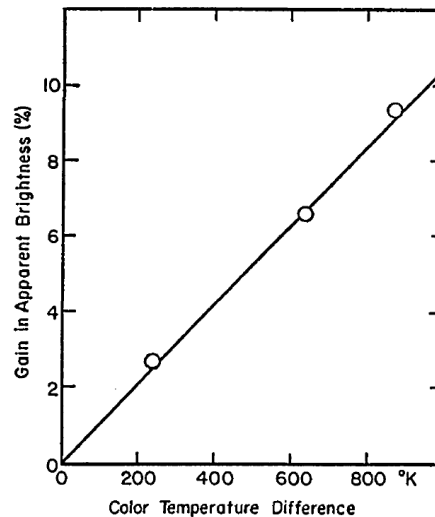


Abbildung 4.16 Helligkeitszunahme in Abhängigkeit der Farbtemperaturdifferenz (Harrington, 1954)

In der Abbildung 4.16 Helligkeitszunahme in Abhängigkeit der Farbtemperaturdifferenz Abbildung 4.16 ist das Ergebnis dieses Experiments dargestellt. Die meisten der 73 Probanden haben weniger Licht mit höherer Farbtemperatur für den gleichen Helligkeitseindruck im Vergleich zu niedriger Farbtemperatur benötigt. Die Zunahme der wahrgenommenen Helligkeit verhält sich dabei linear zur Farbtemperaturdifferenz zwischen den abgeglichenen Lichtquellen. Die Zunahme der Farbtemperatur um 100 K entspricht dabei der Zunahme des Helligkeitseindrucks um 1 %. (Harrington, 1954)

Peter Boyce berichtete 1977 von zwei Versuchen bezüglich der Balance zwischen dem Beleuchtungsstärkeniveau und den Farbeigenschaften der Beleuchtung, wie der Farbtemperatur und der Farbwiedergabe. (Boyce, 1977)

In der Abbildung 4.17 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Dem Probanden wurden zwei identische auf 1/12 verkleinerte Büros präsentiert, die mit einer Wand voneinander getrennt waren. Der Kopf der Probanden befand sich während der Versuche im beschriebenen Aufbau, so dass die Probanden rechts und links die Büros ohne Einschränkungen im Gesichtsfeld bewerten konnten.

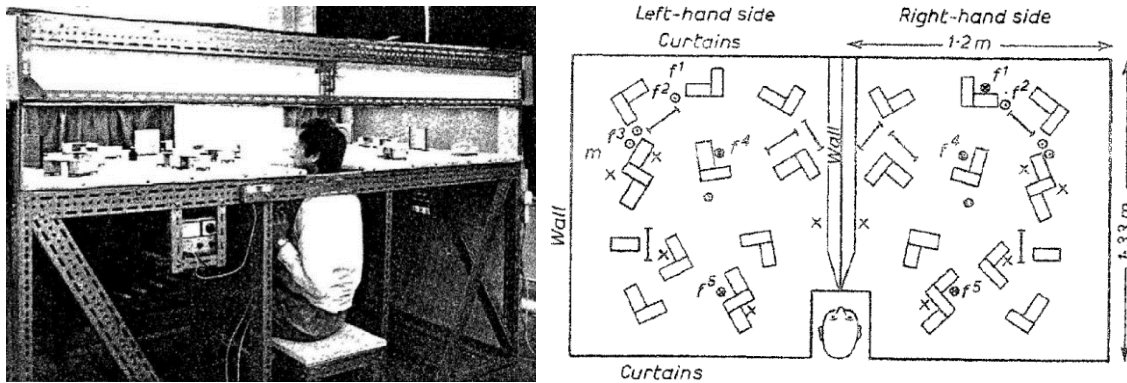


Abbildung 4.17 Versuchsaufbau von Peter Boyce (Boyce, 1977)

Im ersten Versuch gab es drei Variablen, die variiert wurden:

- Leuchtstoff-Lampen, wobei in diesem Versuch „white“, „natural“ und „Kolor-rite“ eingesetzt wurden (siehe Tabelle 4.1);
- Buntheit (*colorfulness*) der Büros in drei Stufen, die durch den Austausch der Wände etc. erreicht wurde;
- Beleuchtungsstärke mit zwei Werten bei 350 lx und 600 lx.

Tabelle 4.1 Leuchtstofflampen in den Versuchen von Boyce (Boyce, 1977)

Fluorescent lamp name	Correlated Colour Temperature (K)	Colour rendering index	Colour discrimination index (Gamut area)	Luminous efficacy (lm/W)
White	3500	56	0.0024	69
Daylight	4300	65	0.0032	64
Natural	4000	85	0.0039	53
'Kolor-rite'	4000	92	0.0041	45
Northlight	6500	95	0.0049	41

In einem einzelnen Versuchsdurchlauf hat der Proband die zwei Büros bei einer vorgegebenen Beleuchtungsstärke bewertet, wobei sie den gleichen Buntheitsgrad aufwiesen. Der Unterschied bestand in der Beleuchtung der Büros mit unterschiedlichen Lampen. Die Probanden haben zunächst die beiden Büros mit Hilfe von Fragebögen bewertet und anschließend die Beleuchtung einer Seite so mit der anderen abgeglichen, dass das visuelle Erscheinungsbild der Büros gleichermaßen zufriedenstellend (*equally satisfactory*) war. Im Anschluss wurden die von den Probanden eingestellten Beleuchtungsstärken ermittelt.

Hier sollen nur die Ergebnisse der Abgleiche vorgestellt und diskutiert werden. In der Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der Abgleiche von vier getesteten Lampenkombinationen „natural/white“, „Kolor-rite/white“, „Kolor-rite/natural“ und „natural/natural“ zusammengefasst. Angegeben sind die Verhältnisse der eingestellten Beleuchtungsstärken. Ein Wert unter Eins bedeutet, dass für den gleichen visuellen Eindruck weniger Licht/niedrigere Beleuchtungsstärke mit der ersten Lampe im Vergleich zur zweiten Lampen nötig war. Die letzte Kombination

diente dem Test bezüglich der Links/Rechts-Verzerrung in der Bewertung, d.h. ob die Probanden eine der Seiten bevorzugen und höher bewerten. Dies konnte zurückgewiesen werden, da kein signifikanter Unterschied von Eins festgestellt wurde.

Die statistische Auswertung von Boyce ergab, dass die Kombinationen „natural/white“ und „Kolor-rite/white“ für alle Versuchsanordnungen im Gegensatz zu „Kolor-rite/natural“ sich signifikant von Eins unterschieden. Diese beiden Kombinationen waren aber nicht signifikant unterschiedlich zueinander, wogegen der Unterschied dieser zwei Kombinationen zur „Kolor-rite/natural“ signifikant war. Weitere Auswertungen wurden bezüglich der Buntheit und des Beleuchtungsstärkeniveaus durchgeführt.

Tabelle 4.2 Verhältnisse der Beleuchtungsstärken aus dem ersten Experiment (Boyce, 1977)

Colour-fulness		Lamp colour combinations							
		Natural/White		'Kolor-rite'/White		'Kolor-rite'/Natural		Natural/Natural	
		350 lux	600 lux	350 lux	600 lux	350 lux	600 lux	350 lux	600 lux
Low	\bar{x}	0.73	0.79	0.77	0.79	1.05	1.07	0.94	0.97
	Standard deviation	0.11	0.18	0.05	0.15	0.17	0.15	0.10	0.06
Medium	\bar{x}	0.76	0.78	0.75	0.68	1.09	1.03	0.98	0.95
	Standard deviation	0.13	0.16	0.14	0.11	0.09	0.08	0.08	0.08
High	\bar{x}	0.68	0.77	0.77	0.85	1.01	1.03	0.96	1.00
	Standard deviation	0.08	0.10	0.10	0.11	0.19	0.09	0.11	0.08

Auch wenn die unterschiedlichen Beleuchtungsstärkeniveaus und die Buntheit der Einrichtung die Ergebnisse leicht beeinflussten, waren laut Boyce die Farbeigenschaften der Beleuchtung entscheidend. Die Hauptschlussfolgerung der statistischen Analyse war, dass mit „natural“ bzw. „Kolor-rite“ Leuchtstofflampen ca. 25% weniger Beleuchtungsstärke nötig war, um den gleichen visuellen Eindruck des Raums zu erreichen.

Peter Boyce versuchte die Ergebnisse hauptsächlich mit den unterschiedlichen Farbwiedergabe-Indizes der Lampen (CRI, CDI) zu erklären, erkannte aber dass seine Ergebnisse auch mit Erkenntnissen von Harrington erklärt werden können. Um dies auszuschließen wiederholte er seinen Versuch mit einer zusätzlichen farblosen Einrichtung der Büros und weiteren Leuchtstofflampen (Daylight und Northlight). Tabelle 4.3 fasst die Ergebnisse des Abgleichs der zusätzlichen Kombinationen.

Tabelle 4.3 Verhältnisse der Beleuchtungsstärken aus dem zweiten Experiments (Boyce, 1977)

	Northlight/ 'Kolor-rite'		Northlight/ Daylight		'Kolor-rite'/ Daylight		'Kolor-rite'/ White		White/ White	
	300 lux	600 lux	300 lux	600 lux	300 lux	600 lux	300 lux	600 lux	300 lux	600 lux
Achromatic interior										
\bar{x}	1.17	0.97	0.98	0.83	1.16	1.12	0.70	0.74	0.98	1.03
Standard deviation	0.50	0.17	0.32	0.26	0.19	0.30	0.09	0.15	0.10	0.09
Coloured interior										
\bar{x}	1.14	1.07	0.81	0.77	1.02	0.98	0.73	0.78	0.97	0.95
Standard deviation	0.33	0.20	0.22	0.16	0.34	0.33	0.15	0.25	0.10	0.13

Mit dem farbigen Interieur waren die Kombinationen „Kolor-rite/White“ und „Northlight/Daylight“ von Eins signifikant verschieden und zeigten somit einen Einfluss der Beleuchtung auf das Ergebnis. Dabei war für „Northlight“ im Vergleich zu „Daylight“ sowie „Kolor-rite“ zu „White“ ebenfalls ca. 25% geringere Beleuchtungsstärke für die gleiche Zufriedenheit ausreichend.

Auch wenn Boyce nicht explizit nach dem Helligkeitseindruck des Raums fragte, so zeigte er deutlich, dass der unterschiedliche Raumeindruck mit verschiedenen Leuchtstofflampen nicht allein mit $V(\lambda)$ -basierten Größen erklärt werden kann. Auch bei einem achromatischen Umfeld hängt der Raumeindruck von Farbeigenschaften der Lichtquellen (wie Farbtemperatur und Farbwiedergabe) ab.

Problematisch an der gesamten Studie, zumindest bezüglich der hier vorliegenden Arbeit, waren mehrere Punkte. Die Büros waren bezüglich ihres visuellen Eindrucks gleichermaßen zufriedenstellend abzugleichen, was eine unklare Fragestellung beim Abgleich ist und sehr viel Interpretationsspielraum für die Probanden lässt. Nicht alle Lampenkombinationen waren gegeneinander und mit allen Raumeinrichtungen getestet. Nicht alle Kombinationen aus der ersten Befragung wurden mit der achromatischen Einrichtung getestet.

Berman untersuchte die Helligkeitswahrnehmung eines Raumes mit weißen Wänden. Zwölf Probanden verglichen Beleuchtungssituationen unter photopischen Bedingungen im Bereich von 30 cd/m² bis 67 cd/m² ohne Einschränkungen des Gesichtsfelds. Es wurden dabei zwei Lichtarten mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung verwendet, welche aber farblich gleich abgestimmt waren. (Berman, et al., 1990)

Die Testkammer maß 2 m×2 m und war 2,3 m hoch. Die Wände wurden mit einer weißen Farbe gestrichen, die spektral aseptisch war. Die Probanden saßen auf einem Stuhl in 1,1 m Abstand von der Wand, die von einer Leuchte über ihrem Kopf beleuchtet wurde (Abbildung 4.15).

Die Leuchte enthielt vier Typen von Leuchtstofflampen, die mit ihren 10°-Farbkoordinaten in der Tabelle 4.4 aufgelistet sind. Während der Versuche kamen die Lichtarten „WWG“ (Mischung aus warmweißen und goldenfarbigen Leuchtstofflampen) und „R213“ (Mischung aus rot- und blaugrünfarbigen Leuchtstofflampen) zum Einsatz, die visuell bezüglich ihrer Farbe möglichst

gleich abgestimmt waren (*best subjective colour match*). Die Kalkulation der Farbmischung im 10°-Farbraum (*calculated predicted metamerie*) erwies sich als nicht zufriedenstellend.

Tabelle 4.4 10°-Farbkoordinaten der verwendeten Leuchtstofflampen (Berman, et al., 1990)

Lamp/condition	x	y
Warm white	0.4565	0.3869
Gold	0.5406	0.4573
Red	0.6858	0.3138
'213'	0.1332	0.5714
Calculated predicted metamerie	0.4824	0.4086
Coordinates that provided best subjective colour match	0.460 (R213) 0.479 (WWG)	0.419 (R213) 0.406 (WWG)

Die Tabelle 4.5 fasst die photopischen und skotopischen Leuchtdichten der vier durchgeführten Vergleiche zusammen. Dabei wurden die zu vergleichenden Lichtarten den Probanden mehrmals im Wechsel mit 5 Sekunden-Intervallen eingeblendet und die Probanden mussten angeben, welche Situation ihnen heller erschien. Insgesamt hat jeder Proband jeden Vergleich zehn Mal durchgeführt.

Tabelle 4.5 Lichtverhältnisse bei den vier durchgeführten Versuchen (Berman, et al., 1990)

Lighting conditions	Comparison 1 WWG/R213	Comparison 2 WWG/R213	Comparison 3 WWG/R213	Comparison 4 WW/WW
Photopic luminance (cd m^{-2})	40 30	67 50	67 30	52 40
Luminance ratio (higher/lower)	1.3	1.3	2.2	1.3
Scotopic luminance (cd m^{-2})	34 73	57 121	57 73	50 39
Luminance ratio (higher/lower)	2.1	2.1	1.3	1.3

In den ersten beiden Vergleichen entschieden die Probanden mit großer Mehrheit (96 zu 12 Stimmen im ersten und 86 zu 34 Stimmen im zweiten Vergleich), dass R213 trotz niedrigerer photopischer Leuchtdichte heller als WWG ist. Die skotopische Leuchtdichte von R213 ist dabei im Vergleich zu WWG mehr als doppelt so hoch. Im dritten Vergleich wurde WWG, das eine mehr als doppelt so hohe photopische Leuchtdichte aufwies, heller bewertet (116 zu 4 Stimmen). Die skotopische Leuchtdichte von R213 war im Vergleich zu WWG immer noch um 30% höher. Statistische Tests zeigten, dass diese Ergebnisse signifikant waren.

Für die gegebenen Testbedingungen mit großen Gesichtsfeldern zeigte Berman, dass die photopische Leuchtdichte nicht ausreicht, um den Helligkeitseindruck richtig vorherzusagen. Der kleine Farbunterschied zwischen den getesteten Lichtarten ist ebenfalls nicht ausreichend, um den Unterschied in der vorliegenden Größenordnung beispielsweise mit dem Ware-Cowan-Modell zu erklären. Für Berman war damit klar, dass die Stäbchen trotz photopischer Leuchtdichten einen Betrag zur Helligkeitswahrnehmung leisten müssen, wobei weder die photopische noch skotopische Leuchtdichte alleine die Ergebnisse erklären. Sie müssen beide gleichzeitig berücksichtigt werden. (Berman, et al., 1990)

In einem Bericht von 1995 veröffentlichte Berman seine Erkenntnisse bezüglich der Rolle der Stäbchen bei der Regulierung der Pupillengrößen und der Helligkeitswahrnehmung bei photopischen Helligkeitsniveaus, die auf mehreren Studien seines Forschungsinstituts, einschließlich der oben genannten, basieren. (Berman, 1995)

Die Formel, die Berman zur Beschreibung der Helligkeitswahrnehmung vorschlug, ist im Abschnitt 4.5 dargestellt. Dabei hängt die Helligkeitswahrnehmung unter realen Bedingungen in der Innenraumbeleuchtung von der photopischen Leuchtdichte korrigiert mit dem Faktor $(S/P)^{0,5}$ ab, der von der spektralen Zusammensetzung des Lichts abhängt. Lichtquellen mit höherem Blauanteil im Spektrum bzw. der höheren Farbtemperatur werden also heller wahrgenommen.

Berman regt dabei eine Überprüfung der photometrischen Grundlagen in der Lichtplanung an, um der Wahrnehmung unter realistischen Bedingungen gerechter zu werden. Damit wären sowohl Energie- und Kosteneinsparungen als auch höhere Benutzerakzeptanz erreicht. (Berman, 1995)

Fotios veröffentlichte 1995 ein Experiment zur Wahrnehmung von blau-gefilterten (3470K) zu normalen (2605K) Glühlampen. Dabei glichen 40 Probanden zwei Kammern mit den beiden Lichtquellen bei vier unterschiedlichen Helligkeitsniveaus ab (siehe Abbildung 4.18). Die linke Kammer wurde mit gefilterten Lampen beleuchtet, wobei je nach Anzahl an eingeschalteten Lampen die Beleuchtungsstärke eingestellt werden konnte. Die rechte Kammer wurde mit ungefilterten Lampen beleuchtet, wobei die Probanden die Lampen dimmen und so auf die gleiche Helligkeit zur linken Kammer abgleichen konnten. (Fotios, et al., 1995)

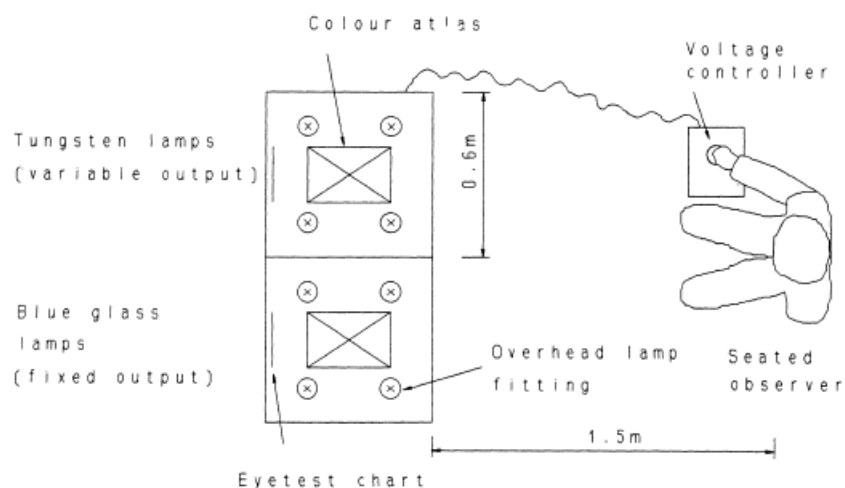


Abbildung 4.18 Versuchsanordnung von Fotios (Fotios, et al., 1995)

Tabelle 4.6 Ergebnisse des Abgleichs (Fotios, et al., 1995)

Number of lamps	One	Two	Three	Four
Number of observations	22	21	21	21
Mean illuminance of tungsten lamps (lux) (A)	349	872	1207	1603
Standard deviation	109	286	385	502
Blue-glass lamp illuminance (lux) (B)	248	490	770	1050
Illuminance difference $(A - B)/A$ (%)	28.9	43.8	36.2	34.5

Die Ergebnisse des Abgleichs sind in der Tabelle 4.6 dargestellt. Im Schnitt waren 35,8% mehr Beleuchtungsstärke mit ungefilterten Lampen notwendig, um die gleiche Helligkeit einzustellen.

Die Auswertung zeigte ferner, dass weder die Verwendung der $V_{10}(\lambda)$ -Funktion noch die Korrektur nach Ware-Cowan, *visual clarity* oder die vorher beschriebene Arbeit von Berman die Größe des Effekts erklären. (Fotios, et al., 1995)

Fotios dehnte die Untersuchungen auf sieben Lampentypen aus (Fotios, et al., 1997). Zudem verbesserte er besonders die Methodik um besser reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Die entsprechenden Kammern aus dem Vorversuch enthielten nun ein Macbeth Chart, eine Sehaufgabe in Schwarz/Weiß, sowie ein blaues Objekt.

In einer Serie von drei Artikeln in LRT (Fotios, et al., 1998) befasste sich Fotios mit der Analyse seiner gewonnenen Ergebnisse. Ziel der Artikelserie war es, verschiedene Ansätze zur Erklärung der Resultate vorzustellen, wobei nicht nur seine eigenen Daten hinzugezogen wurden, sondern auch Rohdaten aus anderen vergleichbaren Untersuchungen.

Fotios nutzte für sein Vorgehen ein zuvor publiziertes Modell als Ausgangsbasis. Die Parameter des Modells wurden mittels der Methode der kleinsten Quadrate auf seinen Datensatz optimiert. Anschließend konnte die Übereinstimmung der Vorhersage des jeweiligen Modells mit den Probandenergebnissen der Helligkeitsabgleiche geprüft werden.

Im ersten Teil wurden das „Gamut area model“ und das „cone surface model“ hinsichtlich Ihrer Eignung untersucht. Diese nutzen eine Korrelation der Helligkeitswahrnehmung mit dem Raum der darstellbaren Farben einer Lichtquelle. Die beste Korrelation wurde mittels der „cone surface area“ erzielt, welche von Boyce (Boyce, 1977) vorgeschlagen wurde.

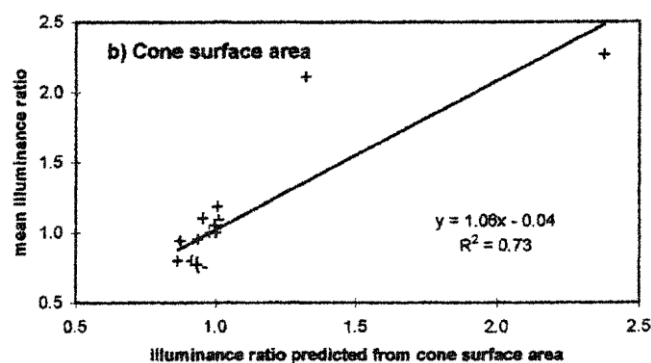


Abbildung 4.19 Modellierung der Daten mittels „cone surface area“ (Fotios, 1998)

Der zweite Teil befasste sich mit den „SWS Lumens“. Diese bedient sich dem Ansatz der „Brightness lumens“ von Berman (Berman, 1995). Jedoch wurde aus physiologischen Gründen kein Beitrag der Stäbchen, sondern ein Beitrag der S-Zapfen zur wahrgenommenen Helligkeit verwendet.

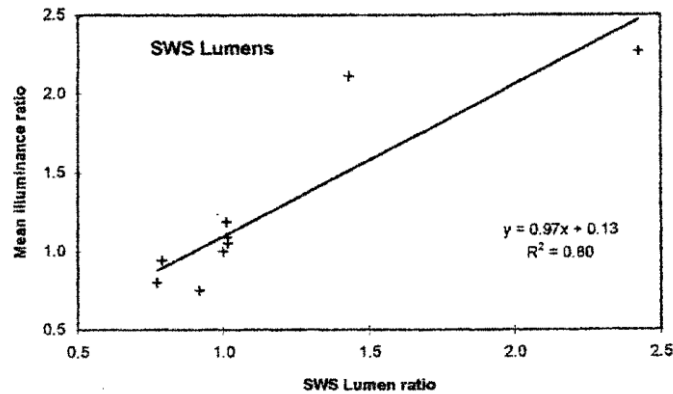


Abbildung 4.20 Modellierung der Daten mittels „SWS Lumens“ (Fotios, et al., 1998)

Es wurden sehr gute Korrelationen erzielt, jedoch schränkt Fotios den Anwendungsbereich stark ein, da dieses Modell stets mit steigender Farbtemperatur zu einer höheren Helligkeit führen würde, was durch Boyce widerlegt wurde (Boyce, 1977).

Der dritte Teil der Serie nutzt das „Chromatic brightness model“ von Thornton (Thornton, 1973), welches die Opponentkanäle der Ganglienzellen als Helligkeitsbeitrag verwendet.

Table 2 Illuminance ratios for visual equality predicted by Chromatic Brightness. (✓ = prediction within 95% confidence interval; × = prediction outside 95% confidence interval)

Lamp combination	Mean illuminance ratio and 95% confidence interval found by experiment		Illuminance ratio predicted by Chromatic Brightness	
FS/WW	0.80	0.76–0.84	0.81	✓
CW/WW	0.94	0.89–0.99	0.93	✓
HPS/WW	2.11	1.86–2.36	2.11	✓
LPS/WW	2.27	1.98–2.56	2.28	✓
WW*/WW	1.09	1.04–1.14	1.01	×
FS*/FS	1.18	1.12–1.24	1.20	✓
CW*/CW	1.05	1.01–1.09	1.04	✓
BG/GLS	0.75	0.69–0.81	0.79	✓

Abbildung 4.21 Modellierung der Daten mittels „SWS Lumens“ (Fotios, et al., 1998)

Hier konnten mit weniger Variablen, höhere Korrelationen von 0,997 erzielt werden, als mit den anderen Modellen.

In einer Literaturstudie (Fotios, 2001) befasst sich Fotios tiefergehend mit der Gewinnung von Helligkeitsabgleichdaten für den Innenraum, speziell zur Abhängigkeit vom Lampenspektrum, sowie der Beleuchtungsstärke. Er stellt besonders die Schwierigkeiten in der Untersuchung des visuellen Systems in den Vordergrund. Experimentelle Bias und Unsicherheiten führen dazu,

dass man existierende Studien nur nach deren ausführlicher Betrachtung wirklich vergleichen kann (Houser, 1999).

Er stellt heraus, dass allein die Gewinnung verlässlicher Messdaten schon schwierig ist. Für verlässliche Daten fehlen oft „Null-Condition-Data“, sowie die Berücksichtigung von „positional bias“ und „dimming“. Das Testdesign sollte nach Möglichkeit ausbalanciert werden, was in der Vergangenheit oft nicht der Fall war. Hinzu kommen weitere Unsicherheiten von publizierten Untersuchungen, wie nicht vergleichbare Lichtverteilungen oder das Fehlen numerischer Werte. Eine unübersichtliche Parameterzahl, sowie nicht konstante Probandenkommunikation stellen weitere Störeinflüsse dar, ebenso erhöhen leichte Variationen im Testablauf die Unsicherheiten zusätzlich.

Nur acht von 21 der untersuchten Publikationen erfüllten die oben genannten Bedingungen. Somit blieben als Lieferanten für verlässliche Daten Studien zu den Themen Farberscheinung, Farbwiedergabe und Beleuchtungsstärke. Als Resultat fasst Fotios zusammen, dass kein Faktor für sich alleine die untersuchten Zusammenhänge erklären kann, da sich der Einfluss der Farbtemperatur und Farbwiedergabe nicht trennen lassen. Bei höherer Farbtemperatur und höherer Farbwiedergabe erscheint eine Beleuchtung heller. Bei gleicher Farbtemperatur erscheint die Beleuchtung mit höherer Farbwiedergabe heller. Ebenso führt aber auch eine höhere Farbwiedergabe und niedrigere Farbtemperatur zu einer stärkeren Helligkeitswahrnehmung.

Die besonderen Versuchsbedingungen und deren Einfluss auf Helligkeitsabgleiche führten zu einer Vertiefung der Literaturstudie in (Fotios, 2002). Dabei wurde genaueres Augenmerk auf die Testmethodik, Stimuluspräsentation, Abgleichkriterium, Stimulusgröße und die Beleuchtungsstärke gelegt.

Bei der Testmethodik gibt es drei grundsätzliche Herangehensweisen: *visual matching*, *brightness ranking* und *subjective ranking*. Vrabel hat *rating* und *ranking* verglichen. Dabei wurden größtenteils übereinstimmende Ergebnisse bezüglich der signifikant unterschiedlichen Helligkeitswahrnehmung gewonnen. Dafür gab es aber auch für zwei von zehn Lichtquellen stark widersprüchliche Resultate. Das gleiche gilt für Untersuchungsdaten von Boyce (Boyce, 1977), aus welchen *rating*- und *matching*-Daten extrahiert werden konnten. Hier wurden auch wieder Diskrepanzen zwischen den Testmethodiken festgestellt, deren mögliche Gründe Adaptationseffekte sind.

Generell gilt, dass beim *matching* ein simultaner Vergleich möglich ist, welcher beim *rating* durch die sukzessive Stimuluspräsentation nicht erreicht werden kann. Diese simultane Situation ist jedoch sehr unnatürlich. Fotios stellt die Hypothese auf, dass aufgrund der Farbkonstanz der Effekt des Spektrums beim Simultanvergleich verstärkt wird, welches sich aber nicht durch die Literatur ausreichend bestätigen lässt.

Das Abgleichkriterium ist enorm wichtig. Bei Simultanvergleichen soll immer eine visuelle Gleichheit erzielt werden, jedoch ist diese immer auf einen definierten Parameter, wie Helligkeit, Beleuchtungsstärke, Klarheit festgelegt. Unterschiedliche Parameter führen zu unterschiedlichen Abgleichen, solange die Lichtfarbe gleich ist. Wenn aber unter gleichen Bedingungen unterschiedliche Parameter abgefragt werden, ist der Abgleich meist sehr ähnlich.

Die Stimulusgröße hat nach der Literaturrecherche von Fotios einen sehr klaren Effekt durch die Rezeptorverteilung, jedoch wurde dieser Parameter in keiner Studie gesondert untersucht und die Datenbasis aus existierenden Publikationen ist leider zu gering um daraus etwas abzuleiten.

Der Einfluss des untersuchten Beleuchtungsstärkenniveaus konnte so herausgearbeitet werden, dass generell die subjektive Bewertung von positiven Effekten der Beleuchtung immer zusammen mit der Beleuchtungsstärke anstieg. Manche Studien fanden heraus, dass Rating-Unterschiede bei höheren Beleuchtungsstärken größer wurden. Wieder andere kamen zum Gegenteil oder fanden gar keinen Effekt.

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der von Fotios analysierten Publikationen zum Einfluss des Spektrums auf den Helligkeitseindruck leidet generell daran, dass die Vielfalt der Versuchsbedingungen so groß ist. Er hebt jedoch den Ansatz von Vrabel (Vrabel, et al., 1998) heraus, die Ergebnisse der Helligkeitsabgleiche nach Probanden zu klassifizieren. Vrabel zeigte, dass bei einer Lampenkombination der Abgleich der einen Hälfte der Probanden von der anderen Hälfte der Testpersonen signifikant heller wahrgenommen wurde.

4.8 Ableitung von Hypothesen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde Literatur vorgestellt, welche die Basis für das Studiendesign darstellte. Als Ergebnis der Literaturrecherche steht die Bildung der Hypothesen für die durchzuführenden Untersuchungen.

Der Stand der Forschung zeigt keine einheitliche Meinung zum Einfluss des Lampenspektrums. Von keinem Einfluss (Boyce, 2003) bis hin zu 40% (Berman, et al., 1990) sind alle Aussagen vertreten. Vornehmlich aus diesen Gründen wird die Variation des Lampenspektrums in diese Untersuchung inkludiert. Eine ausschließliche Variation der Farbtemperatur scheint nicht ausreichend, da durch Fotios und andere bestätigt wurde, dass auch gleiche Farbtemperaturen zu unterschiedlichen Präferenzen führen können.

Entsprechend Vrabel (Vrabel, et al., 1998) soll geprüft werden, ob die Anwendung unterschiedlicher Sätze von Modellparametern auf das Probandenkollektiv dazu führt, dass eine höhere Korrelation der Versuchsergebnisse mit den Modellen erreicht werden kann.

Hypothesen für die Ergebnisse der folgenden Untersuchungen:

1. Szenen, welche mit höheren Farbtemperaturen beleuchtet werden, werden bei gleicher photopischer Leuchtdichte heller wahrgenommen, als bei niedrigeren Farbtemperaturen.
2. Die Vorhersagen der Modelle für größerer Gesichtsfelder aus Kapitel 4.4 sowie Kapitel 4.7 erklären die Helligkeitsabgleiche besser als die vorgestellten Modelle für kleinere Gesichtsfelder.
3. Das Probandenkollektiv lässt sich in mehrere Gruppen unterteilen, deren Helligkeitswahrnehmung sich grundsätzlich unterscheidet.

5 Methoden

Die CIE hat das technische Komitee TC1-80 „Research Methods for Psychophysical Studies of Brightness Judgements“ mit der Zusammenfassung der vorhandenen Untersuchungsmethodik bezüglich der Helligkeitswahrnehmung und der Erstellung des Untersuchungsleitfadens in diesem Forschungsbereich beauftragt. Damit sollen grobe Fehler vermieden werden und die Vergleichbarkeit der Studien verbessert werden. Die vorliegende Arbeit orientiert sich daher an dem vorliegenden Entwurf des Komitees. (CIE TC1-80, 2012)

5.1 Versuchsraum und Beleuchtung

Alle Versuche, die in dieser Arbeit beschrieben werden, fanden in einem Raum statt, der vom Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt für die Studie zur Verfügung gestellt und im Rahmen dieser Arbeit konzipiert und umgebaut wurde. Dieser Raum wurde mit austauschbaren Wandpaneelen ausgestattet und hat nach der Umrüstung die Maße von 5,40 m × 3,10 m mit einer Höhe von 2,45 m (siehe Abbildung 5.1).

Zur Aufnahme der Beleuchtung für die Versuche und der dazugehörigen Steuerelektronik wurde eine abgehängte Decke installiert (Abbildung 5.2). Das installierte Deckensystem hat ein 62,5 cm-Standardraster und bietet die Möglichkeit verschiedene Leuchten schnell und sauber installieren, austauschen bzw. warten zu können.

Zusätzlich zur Raumbeleuchtung mit Leuchtstofflampen, die während der Renovierungsarbeiten installiert wurde und die nicht für Wahrnehmungsversuche vorgesehen sind (eingeschaltete Leuchten in Abbildung 5.2), wurden 40 Downlights für vier unterschiedliche Lichtquellen in jeweils Vierergruppen und neun flache, diffus abstrahlende Leuchten mit fünf integrierten Lichtquellen in die Decke eingebaut.



Abbildung 5.1 Multifunktionsraum mit abgehängter Kastendecke



Abbildung 5.2 Abgehängte Decke mit installierten Leuchten

Die Downlights aus der PANOS-Familie der Fa. Zumtobel sind für folgende Lichtquellen vorgesehen:

- 1 × HIT-TC-CE 35 W; Fassung: G 8,5
- 1 × QT-LP12 / 100 W max.; Fassung: GY 6,35
- 2 × 18 W TC-DEL und
- LED-Leuchte mit "Tunable White"-Technologie (einstellbare Farbtemperatur zwischen 2700-6500K) und max. 27 W

Die Leuchten besitzen je ein elektronisches Vorschaltgerät und werden über das standardisierte DALI-Protokoll gesteuert.

Da diese Downlights nicht in den hier beschriebenen psychometrischen Versuchen verwendet wurden, werden sie nicht näher beschrieben.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Versuche wurden ausschließlich mit den flachen, rechteckigen Einbauleuchten durchgeführt, die im Laufe der beschriebenen Arbeit konstruiert und aufgebaut wurden.

Die Leuchten haben eine breitstrahlende Charakteristik, so dass der Raum gleichmäßig und schattenfrei ausgeleuchtet wird. Sie sind so konstruiert, dass die Lichtstärkeverteilung unabhängig von der eingeschalteten Lichtquelle möglichst gleich bleibt und den Raum in den Versuchen möglichst gleich ausleuchtet. Damit soll ermöglicht werden, die Wahrnehmung allein in Abhängigkeit der Helligkeit und des Spektrums der eingeschalteten Lichtquelle zu untersuchen.

Abbildung 5.3 zeigt den Innenaufbau der Leuchten, bestehend aus den LED-Modulen auf schwarzen Kühlkörpern, sowie den Halogenglühlampen und den röhrenförmigen Leuchtstofflampen. Die elektronischen Vorschaltgeräte für die Leuchtstofflampen befinden sich in der Leuchte, während die Stromtreiber für die LEDs und Dimmer für die Halogenglühlampen extern in der abgehängten Decke eingebaut sind.

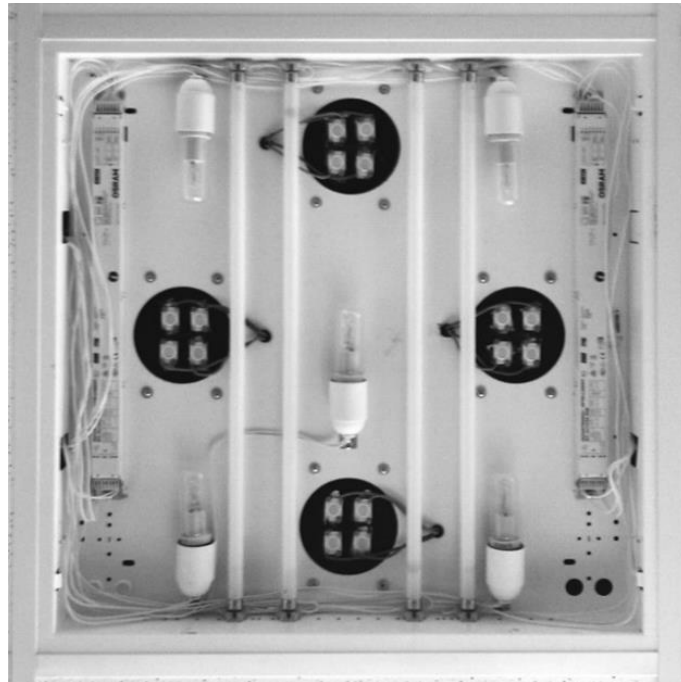


Abbildung 5.3 Ansicht der verwendeten Leuchten ohne Abdeckscheibe

Als Abschlusscheibe wurden farblose PLEXIGLAS® Satinice-Platten vom Typ OD010 DF der Firma Evonik Industries verwendet. Dieses transluzente Material wurde aufgrund der hohen Transmission (83 %), der hohen, gleichmäßigen Lichtstreuung und der spektralen Aselektivität ausgewählt. Sie wurden speziell für die Verwendung in Leuchten und Lichtinstallationen entwickelt.

Folgende Lichtquellen sind in jeder der flachen Leuchten eingebaut:

- 8 × High Power LED CL-L233-MC13W1-C von Citizen; elektrische Leistung 13,4 W; Farbtemperatur 4000 K; angegebene Farbwiedergabe $R_a = 85$
- 8 × High Power LED CL-L233-MC13L2-C von Citizen; elektrische Leistung 13,4 W; Farbtemperatur 2700 K; angegebene Farbwiedergabe $R_a = 85$
- 2 × OSRAM HO 24 W/840; Lumilux Cool White
- 2 × OSRAM HO 24 W/827; Lumilux Interna
- 5 × OSRAM Halolux Ceram Eco 70 W Halogen-Glühlampen

Diese Leuchten werden mit Hilfe des DMX-Protokolls gesteuert, wobei die Anbindung ans DALI-Netzwerk über das DALI/DMX-Gateway Richter DDC-1 erfolgt.

Die Bedienung und Konfiguration des im Raum aufgebauten DALI basierten Lichtsteuerungssystems erfolgt über das EMOTION-Touch Bedienpanel der Fa. Zumtobel.

5.2 Charakterisierung der Lichtszenarien

Die Versuche, die in dieser Arbeit beschrieben werden, wurden bei mittleren Leuchtdichten an der Wand von 20, 50, 100, 150, 200, 250 und 300 cd/m^2 , dessen Helligkeit die Probanden zu beurteilen hatten, durchgeführt. Daher wurden sowohl die Messungen der Leuchtdichte als auch die spektroradiometrischen Messungen bei genau diesen mittleren Leuchtdichten durchgeführt.

Davon abgeleitet haben alle Einstellungen eindeutige Namen, die sich aus der Abkürzung des Lichtquellentyps, der ähnlichsten Farbtemperatur und der mittleren Sollleuchtdichte zusammensetzen. Tabelle 5.1 fasst alle Kombinationen zusammen, die in dieser Arbeit durchgehend verwendet werden.

Das Fehlen der Einstellungen mit den Bezeichnungen „LL27 20“ und „LL40 20“ erklärt sich dadurch, dass es im Raum nicht möglich ist, die Leuchtstofflampen so stark zu dimmen. Diese Werte wären nur durch die Abschaltung einzelner Lampen möglich. Die Beibehaltung der gleichen Lichtverteilung und Gleichmäßigkeit zu anderen Lichtquellen wäre aber nicht realisierbar.

Tabelle 5.1 Übersicht der verwendeten Einstellungen und dessen Bezeichnung

	Halogen-glüh-lampe	LED		Leuchtstofflampe	
		2700 K	4000 K	2700 K	4000 K
20 cd/m^2	HAL 20	LED27 20	LED40 20	—	—
50 cd/m^2	HAL 50	LED27 50	LED40 50	LL27 50	LL40 50
100 cd/m^2	HAL 100	LED27 100	LED40 100	LL27 100	LL40 100
150 cd/m^2	HAL 150	LED27 150	LED40 150	LL27 150	LL40 150
200 cd/m^2	HAL 200	LED27 200	LED40 200	LL27 200	LL40 200
250 cd/m^2	HAL 250	LED27 250	LED40 250	LL27 250	LL40 250
300 cd/m^2	HAL 300	LED27 300	LED40 300	LL27 300	LL40 300

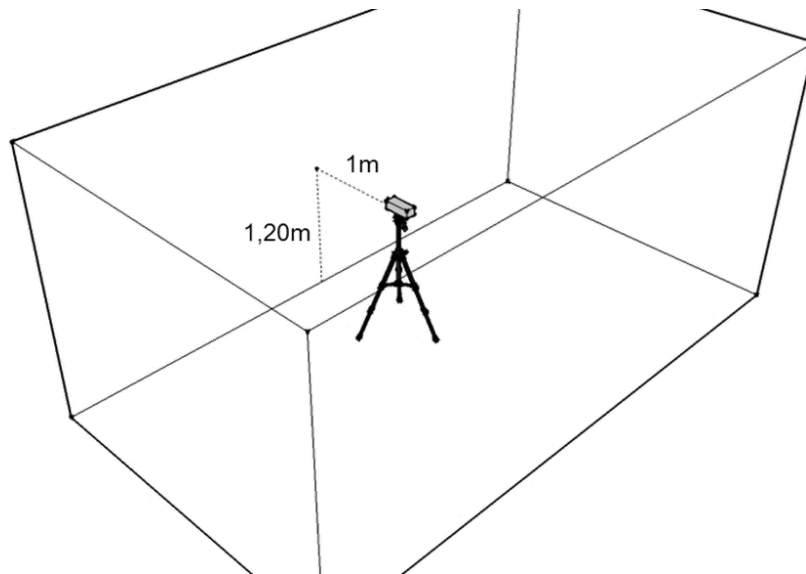


Abbildung 5.4 Aufnahme der Spektren und Leuchtdichten an der Wand aus der Sicht der Probanden

Die Messgeräte zur Charakterisierung wurden an der gleichen Position aufgestellt, von welcher aus die Probanden die Helligkeit der beleuchteten Wand bewertet haben. Wie in Abbildung 5.4 dargestellt, wurden die Messgeräte auf einem Stativ in 1,20 m Höhe über dem Boden und 1 m Abstand zur Wand aufgestellt.

Als Messgeräte kamen eine LMK 98-3 mit einem Fischaugenobjektiv der Fa. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH für die orts aufgelöste Messung der Leuchtdichteverteilung an der Wand und ein Spektroradiometer CS-1000 von KonicaMinolta zur Messung der an der Wand herrschenden, spektralen Strahldichte zum Einsatz.



Abbildung 5.5 Leuchtdichtekamera LMK 98-3 von TechnoTeam



Abbildung 5.6 Spektroradiometer CS-1000 von KonicaMinolta

5.2.1 Leuchtdichtemessungen

Die Bezugsgröße bei den durchgeführten Messungen und der späteren Auswertung ist die mittlere Leuchtdichte auf der Wand. Mit dem Fischaugenobjektiv konnte die komplette, vom Probanden zu bewertende Wand mit einer Aufnahme erfasst werden, wie dies in Abbildung 5.7 zu sehen ist.

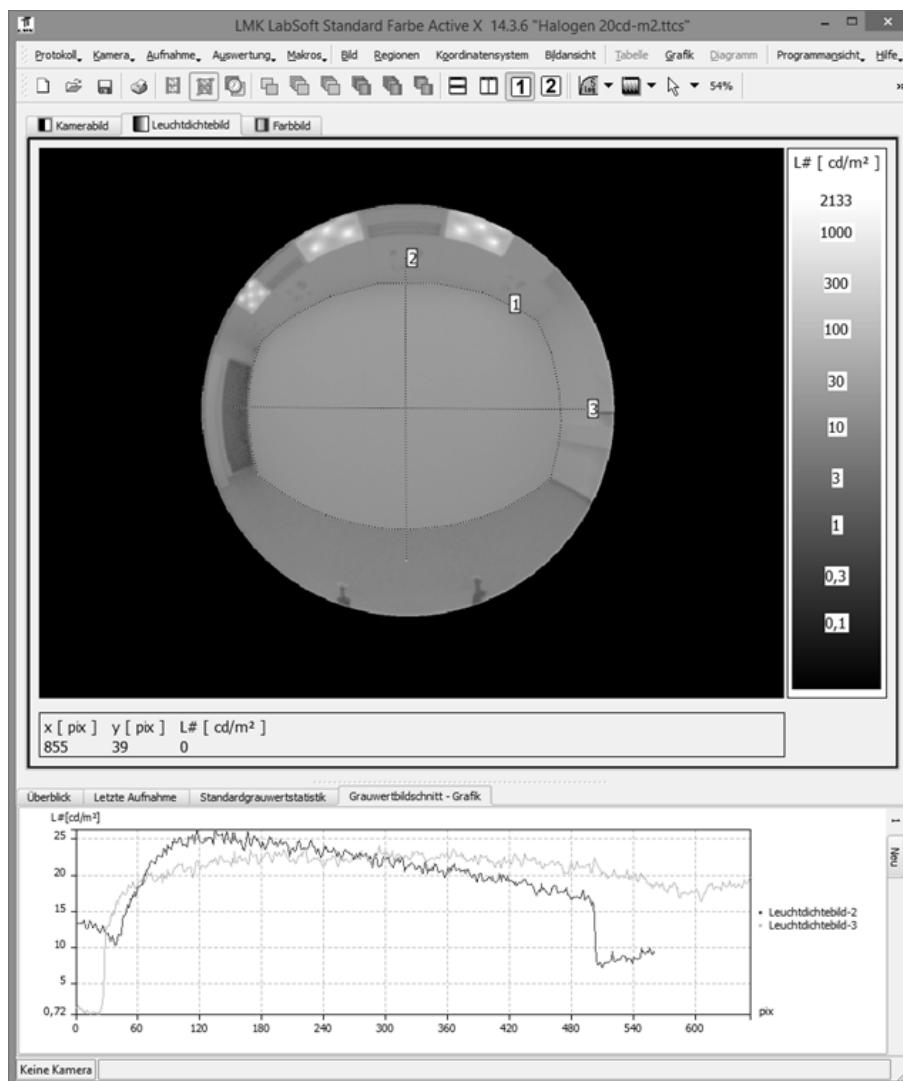


Abbildung 5.7 Leuchtdichteaufnahme der zu bewertenden Wand mit ausgewerteten Regionen

In der Abbildung 5.7 wurde die Region 1 zur Bestimmung der mittleren Leuchtdichte verwendet. Die Linien 2 und 3 zeigen den leichten Helligkeitsgradienten von oben nach unten (dunkle Linie im Diagramm im unteren Bereich der Abbildung 5.7), sowie die gleichmäßige Ausleuchtung horizontal (die helle Linie im Diagramm). Alle Szenen mit verschiedenen Leuchtdichten weisen diesen Verlauf auf. Der vertikale Leuchtdichteabfall beträgt dabei ca. 30 %.

Tabelle 5.2 fasst die gemessenen, mittleren Leuchtdichten und die zugehörige Streuung der Leuchtdichte in der Region 1 zusammen. Da die relative Streuung (bezogen auf die mittlere

Leuchtdichte) sich nicht mit der Dimmung verändert, sind die Werte nach Lichtquellen angegeben.

Tabelle 5.2 Gemessene mittlere Leuchtdichten (in cd/m^2) und die Streuung an der Wand (Region 1 in Abbildung 5.7)

	HAL	LED27	LED40	LL27	LL40
20 cd/m^2	20,4	20,1	20,5	—	—
50 cd/m^2	50,5	50,1	49,7	50,1	56,6
100 cd/m^2	100,1	100,2	100,3	100,0	99,4
150 cd/m^2	156,5	150,0	150,0	151,4	151,9
200 cd/m^2	199,3	200,5	200,3	199,8	199,6
250 cd/m^2	249,9	250,6	250,7	252,3	250,8
300 cd/m^2	299,3	300,2	300,7	273,3	273,7
Streuung	15,3 %	11,7 %	11,0 %	14,7 %	15,1 %

Die Leuchtdichten, die in der ersten Spalte angegeben sind, stellen die geplanten Sollleuchtdichten dar. Da die DALI-Steuerung mit acht Bit diskretisiert ist, konnten dementsprechend die tatsächlichen Leuchtdichten im Raum nur annähernd an die Sollwerte eingestellt werden.

5.2.2 Spektrale Charakterisierung

Die Spektren wurden als Strahldichte der Wand in Blickrichtung der Probanden gemessen. Die Kameraposition ist exakt gleich zu den Leuchtdichteaufnahmen und erfasst einen Bereich von 2° im Zentrum des Gesichtsfelds.

Abbildungen 3.8 bis 3.10 zeigen die gemessenen Spektren der verwendeten Lichtquellen.

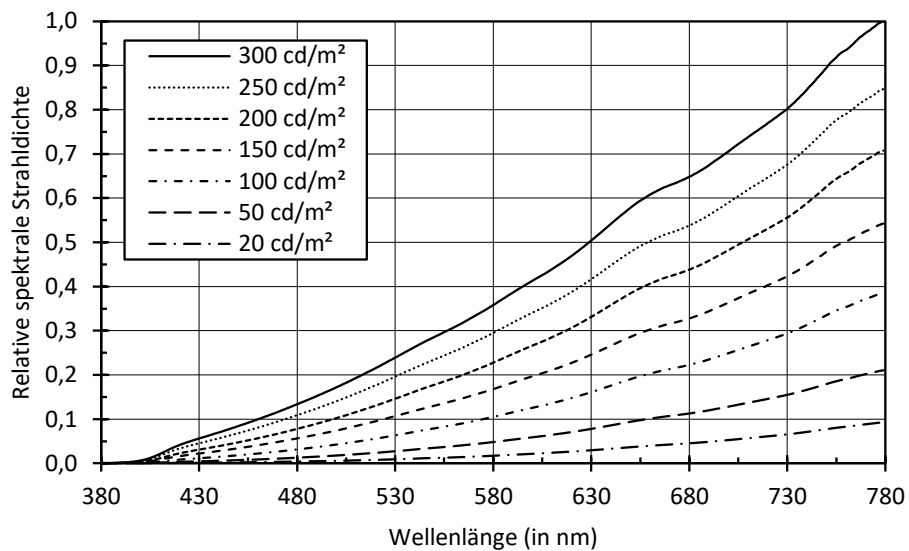


Abbildung 5.8 An der Wand reflektierte Spektren für die Beleuchtung mit Halogen-Glühlampen

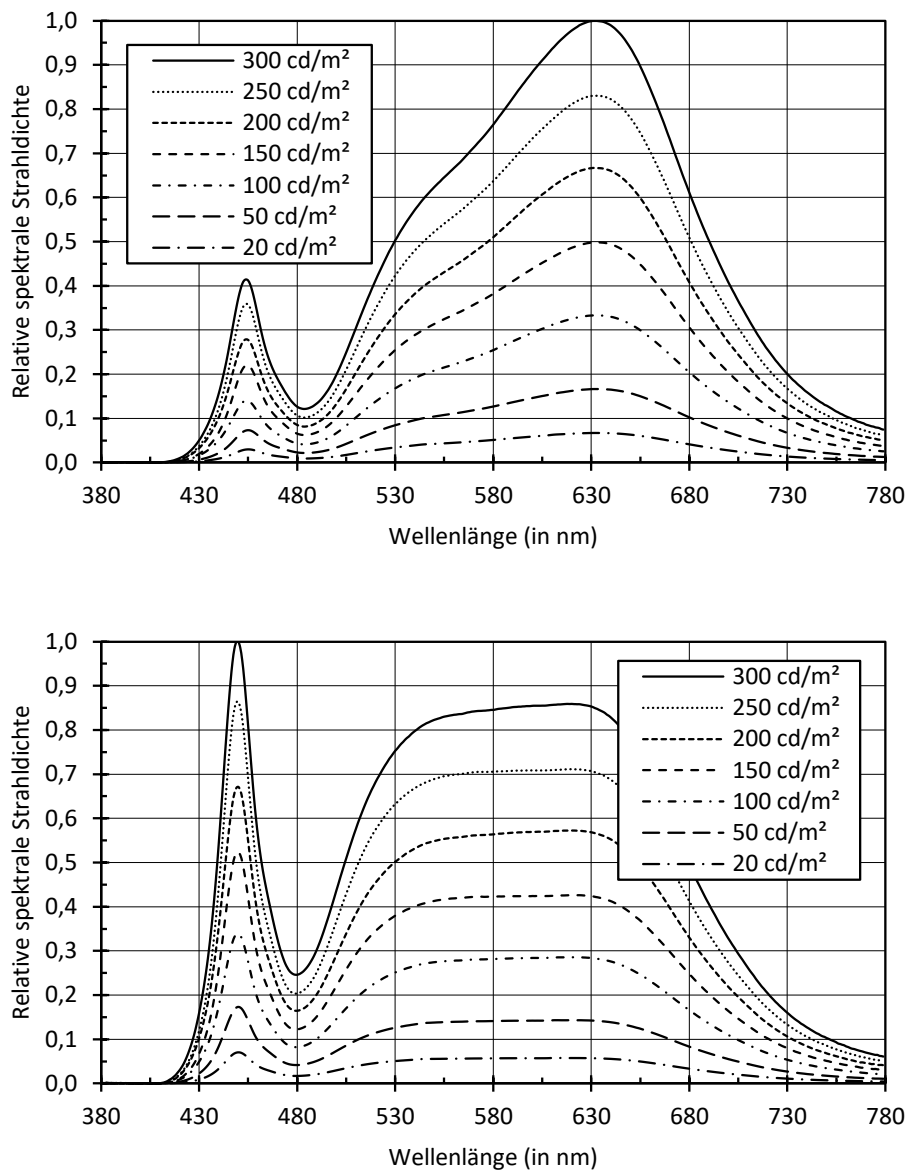


Abbildung 5.9 An der Wand reflektierte Spektren für die warmweiße (oben) und die neutralweiße (unten) LED-Beleuchtung

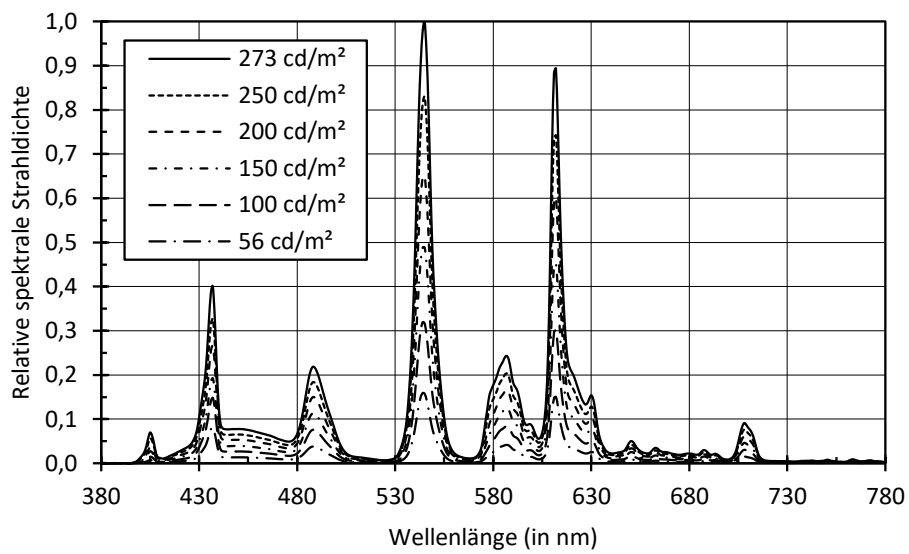
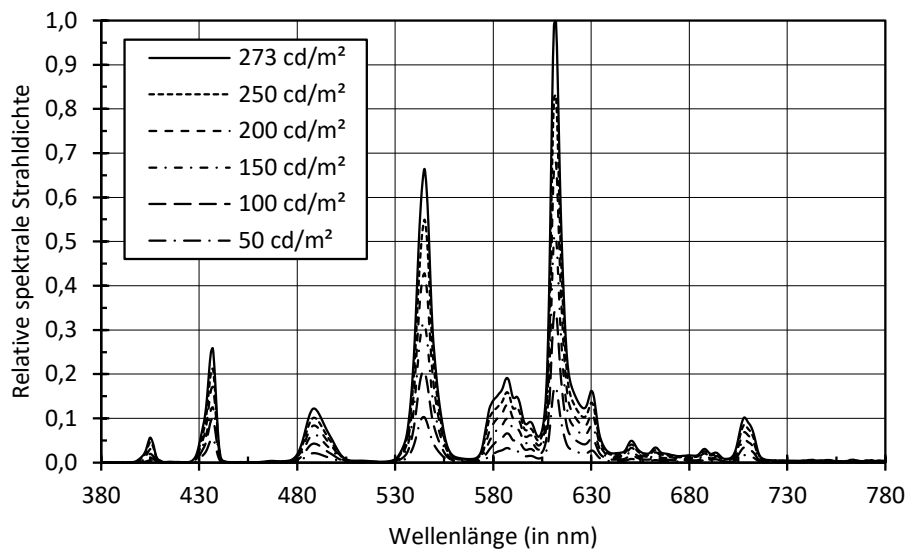


Abbildung 5.10 An der Wand reflektierte Spektren für die warmweiße (oben) und die neutralweiße (unten) Beleuchtung mit Leuchtstofflampen

Die von den Spektren abgeleiteten Größen für die verwendeten Einstellungen, wie die CIE 1931 x, y -Farbwertanteile für 2°- und 10°-Normalbeobachter, die Farbtemperatur und den allgemeinen Farbwiedergabeindex, sind im Anhang 9.1 auf Seite 100 zusammengefasst. Abbildung 5.11 stellt die Lage der Farbörter der unterschiedlichen Lichtquellen graphisch dar.

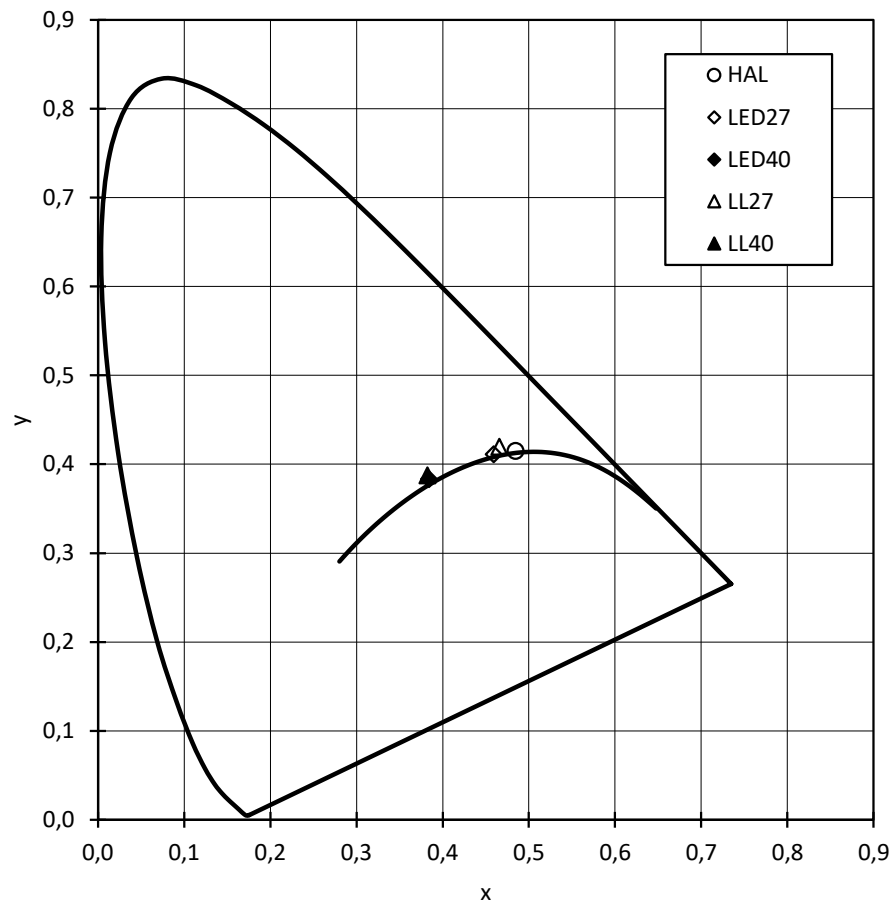


Abbildung 5.11 Lage der Farbörter der in Versuchen verwendeten Lichtquellen im CIE 1931 xy -Farbraum

Die detaillierte Darstellung der Lage der Farbörter der verschiedenen Lichtquellen zeigt Abbildung 5.12.

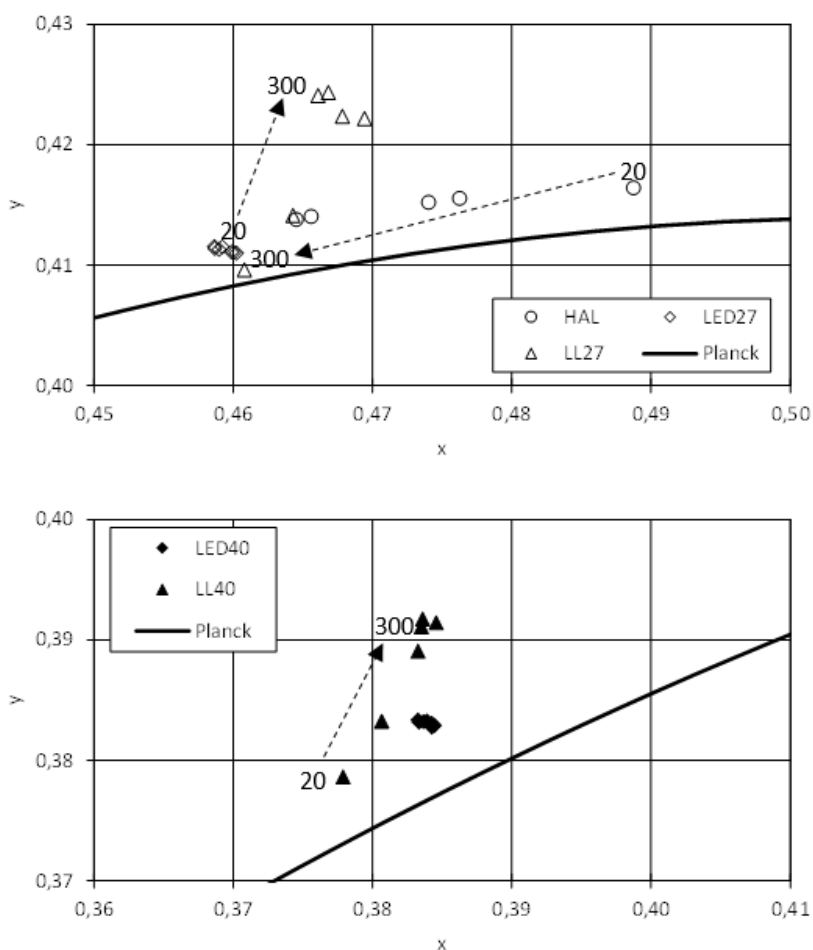


Abbildung 5.12 Verschiebung der Farbörter der warmweißen (oben) und der neutralweißen (unten) Lichtquellen bei unterschiedlicher Dimmung im CIE 1931 x,y-Diagramm

Dabei zeigt die Halogenglühlampe erwartungsgemäß die größte Verschiebung des Farbortes aufgrund der Veränderung der Dimmung, da sich die Temperatur der Glühwendel aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Leistung verändert. Die Farbörter wandern entlang des Planck'schen Kurvenzuges.

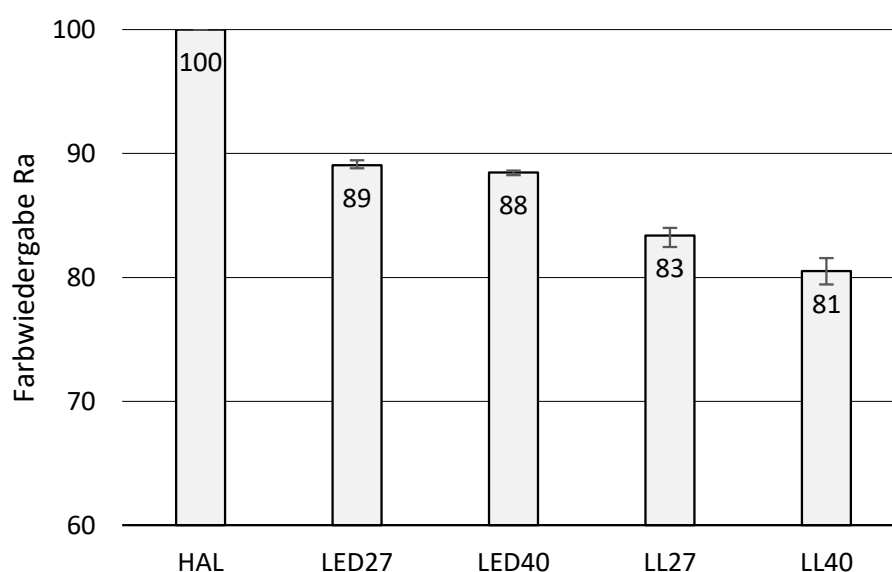
Die Leuchtstofflampen haben eine geringere Drift als die Halogenglühlampen. Die LEDs dagegen haben unabhängig vom Dimmzustand einen nahezu stabilen Farbort.

Die maximalen Farbabweichungen im $u'v'$ -Farbraum zwischen den beiden am weitesten voneinander entfernten Farbörtern einer Lichtquelle sind in der Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3 Maximale Farbabweichung beim Dimmen der verwendeten Lichtquellen

Lichtquelle	$\Delta E_{u'v'}$
HAL	0,0362
LED27	0,0012
LED40	0,0007
LL27	0,0069
LL40	0,0063

Die allgemeine Farbwiedergabeindizes der verwendeten Lichtquellen sind in der Abbildung 5.13 dargestellt. Die Fehlerindikatoren in der Abbildung werden zur Anzeige der jeweiligen maximalen und minimalen Werte der Farbwiedergabe verwendet, die sich aufgrund der Änderungen des Spektrums beim Dimmen ergeben.

Abbildung 5.13 Allgemeine Farbwiedergabeindizes R_a der eingesetzten Lichtquellen

Mit $R_a > 80$ entspricht die Farbwiedergabe der eingesetzten Lichtquellen den Mindestanforderungen der einschlägigen Normen und Richtlinien für die Bürobeleuchtung. Während die Halogenleuchtstofflampen definitionsgemäß eine Farbwiedergabe von 100 aufweisen, haben die Leuchtdioden einen sehr stabilen Wert von ca. 89, was über den Datenblattangaben ($R_a = 85$) liegt. Die Farbwiedergabe der Leuchtstofflampen ändert sich mit der Dimmung leicht und beträgt für warmweiße Lampen 83 und neutralweiße 81.

Die Szenen wurden wie beschrieben mit Soll-Leuchtdichten eingestellt und danach spektral gemessen. Ob die Leuchtdichtekamera aufgrund des *color mismatch* (Abweichung der realen

spektralen Empfangscharakteristik der Kamera von der $V(\lambda)$ -Funktion) einer Korrektur bedarf, wird mit Hilfe des Korrekturfaktors $SMCF$ (Formel 5.1) beschrieben. (DIN 67519, 1970; CIE, 2014)

$$SMCF = \frac{\int S_{test}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \times \int S_{cal}(\lambda) X(\lambda) d\lambda}{\int S_{test}(\lambda) X(\lambda) d\lambda \times \int S_{cal}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad 5.1$$

Dabei sind $X(\lambda)$ die spektrale Empfindlichkeit des Messgeräts, $S_{test}(\lambda)$ das zu messende Spektrum und $S_{cal}(\lambda)$ das Spektrum, mit dem das Messgerät kalibriert wurde. Diese Angaben sind dem Kalibrierschein der Leuchtdichtekamera entnommen worden.

Da die Werte des $SMCF$ zwischen 0,9993 und 1,0026 für die verschiedenen Lichtszenen und Spektren liegen, also einer Abweichung im Bereich weniger Promille entsprechen, wurde von einer Korrektur der Leuchtdichtewerte abgesehen.

5.2.3 Zeitliches Einschaltverhalten

Alle verwendeten Lichtquellen besitzen Vorschalt- bzw. Steuergeräte, über die sie betrieben werden und die Signale aus der zentralen Steuerung verarbeiten. Da es unbekannt war, welches zeitliche Einschaltverhalten die Lichtquellen haben und ob dieses möglicherweise einen Einfluss auf die Helligkeitsbewertung ausübt, wurden die Pulsformen mit der Photodiode DET10A von Thorlabs Inc. und dem Oszilloskop GDS-1062 von GW Instek aufgezeichnet.

Die siliziumbasierte Photodiode hat eine Anstiegszeit von 1 ns und eignet sich damit hervorragend zur Messung schneller Änderungen in der Lichtintensität. Sie verfügt über einen integrierten Signalwandler und Verstärker und gibt am Ausgang ein der Lichtintensität linear proportionales 0-10 V-Signal aus.

Der Empfänger war in der Mitte des Raumes auf einer Höhe von 75 cm positioniert und nach oben ausgerichtet.

In Abbildung 5.14 sind die Spannungsänderungen an der Photodiode für die ersten 150 Sekunden nach dem Einschalten der Leuchtstofflampen mit fünf unterschiedlichen Dimmstufen dargestellt.

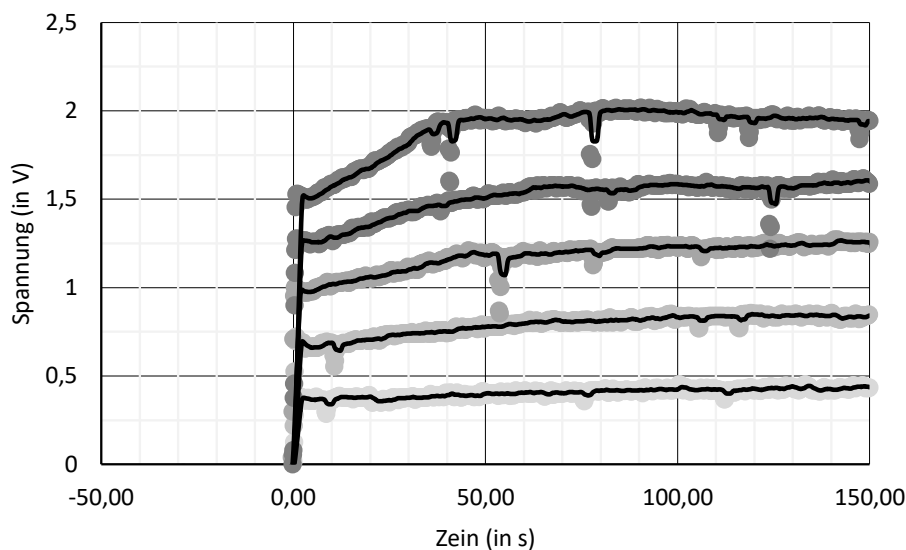


Abbildung 5.14 Spannung an der Photodiode beim Einschalten der Leuchtstofflampen mit den Dimmstufen 10 %, 30 %, 50 %, 70 % und 100 % (Kurven von unten nach oben) für die ersten 150 Sekunden

Wie zu erkennen ist, zeigen die Leuchtstofflampen keinen linearen Anlauf in der Intensität. Unabhängig der Dimmstufe erreichen die Lampen schnell (ca. 400 ms) 76 – 80 % des Endwertes im eingeschwungenen Zustand und steigen danach linear auf den Endwert an. Diese Anstiegszeit variiert mit der Dimmstufe. Je niedriger die gewünschte Helligkeit umso langsamer ist auch der Anstieg. Die gemessenen Werte sind in der Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Tabelle 5.4 Zusammenfassung der Kennwerte des Anlaufverhaltens der Leuchtstofflampen

Dimmstufe	Spannung im stabilen Zustand (in V)	Spannungswert direkt nach dem Einschalten (in V)	Anteil vom Endwert direkt nach dem Einschalten	Dauer bis zur Stabilisierung (in s)
10 %	0,45	0,35	78 %	100
30 %	0,85	0,65	76 %	75
50 %	1,27	0,97	76 %	50
70 %	1,57	1,25	80 %	50
100 %	1,97	1,50	76 %	35

In Gegensatz zu den Leuchtstofflampen steigen die Halogenleuchtstofflampen und die Leuchtdioden sehr schnell auf ihren maximalen bzw. eingestellten Intensitätswert an (siehe Abbildung 5.15). Die Anstiegszeiten, also die Zeit zwischen dem 10 %- und 90 %-Signalpegel, betragen für die

Halogenglühlampen 70 Millisekunden und für die Leuchtdioden 62 Millisekunden. Diese Zeiten variieren dabei kaum mit verschiedenen Dimmstufen.

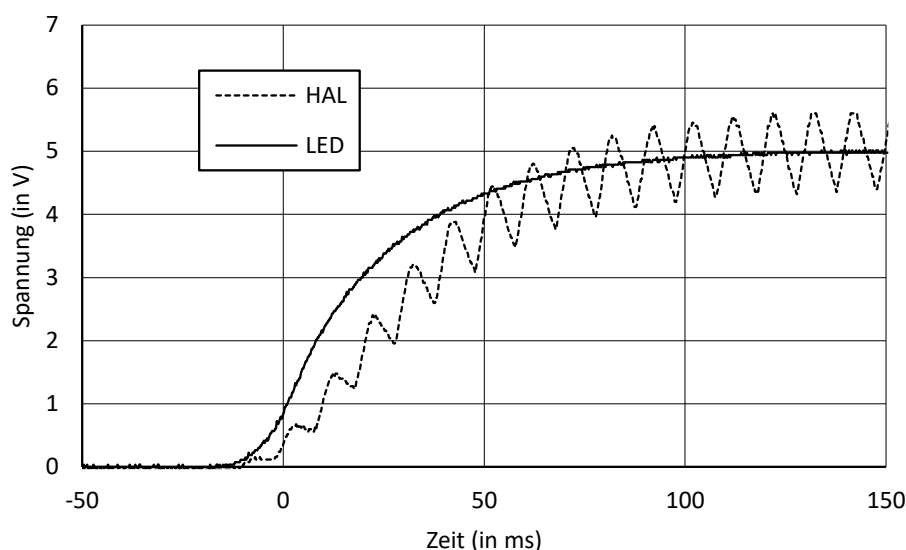


Abbildung 5.15 Spannungsverlauf an der Photodiode beim Einschalten der Halogenglühlampen und die Leuchtdioden für die ersten 150 Millisekunden

Diese kurze Anstiegszeit ist nicht bemerkbar. Es scheint, als würde das Licht sofort die gewünschte Intensität erreichen. Die Leuchtstofflampen scheinen sich im ersten Moment ebenfalls ohne Verzögerung einzuschalten, werden dann aber im Laufe der Zeit deutlich heller.

Ob dies auch einen tatsächlichen Einfluss auf die Wertung durch die Probanden hat, ist in einem Vorversuch mit zwei Probanden (P2 und P9), die auch später an der Hauptuntersuchung teilgenommen haben, untersucht worden. Dieser Vorversuch wird im Folgenden dargestellt.

Um den Einfluss des Spektrums der Lichtquelle zu eliminieren und allein die Abhängigkeit der Helligkeitswertung von der zeitlichen Komponente zu untersuchen, wurde das Verhalten der Leuchtstofflampe mit der LED (4000K) nachmodelliert. Abbildung 5.16 zeigt den Verlauf einer Szene, die der Leuchtstofflampe entspricht, gemeinsam mit Vergleichsszenen.

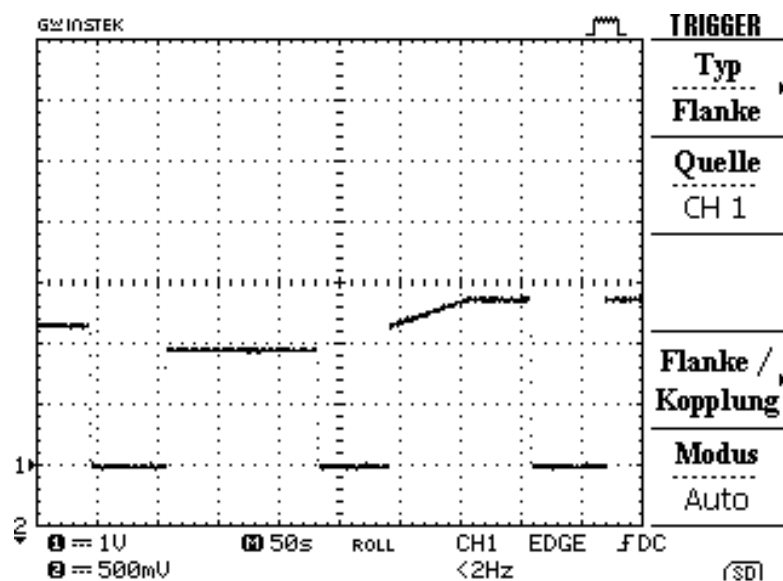


Abbildung 5.16 Oszilloskopaufnahme des Photodiodensignals in der Abfolge der LED-Szenen

Die Szenen für diese Untersuchung wurden folgendermaßen festgelegt und gemessen:

- i. Modellierte Szene: Übergang von DALI-Wert 40 % auf 50 % innerhalb von einer Minute
- ii. DALI-Wert 30 %; entspricht mittlerer Leuchtdichte an der Wand von $145,4 \text{ cd/m}^2$
- iii. DALI-Wert 40 %; entspricht $176,4 \text{ cd/m}^2$
- iv. DALI-Wert 50 %; entspricht $209,1 \text{ cd/m}^2$
- v. DALI-Wert 60 %; entspricht $243,6 \text{ cd/m}^2$.

Auch wenn den Probanden in den Helligkeitsversuchen eine Adaptationszeit von zwei Minuten eingeräumt wurde, die in jedem Fall ausreichend zur Stabilisierung der Leuchtstofflampen ist, ist nicht klar wie und vor allem wann die Probanden sich eine Meinung über die Helligkeit bilden. Ein mündliche Befragung einiger Probanden, ohne Anspruch auf Ausführlichkeit oder Repräsentativität, hat ergeben, dass die Probanden der Meinung sind, gedanklich in den ersten 10-20 Sekunden nach dem Einschalten eine Bewertung festzulegen und dass die lange Adaptationszeit eigentlich nicht nötig ist. Das würde heißen, dass obwohl die Szene i hier in Maximum einen DALI-Wert von 50 % hat, eine dem DALI-Wert von 40 % entsprechende Bewertung geben würden.

Da sich dies schwer mit Hilfe physikalischer Messungen feststellen lässt und auf Abgleichversuche in dieser Arbeit verzichtet wird, kam eine psychologische Skalierungsmethode zum Einsatz. Es wurde der paarweise Vergleich der Szenen i bis v durchgeführt.

Die Szenen wurden nacheinander den zwei Probanden vorgeführt. Sie mussten bewerten, ob die aktuelle Szene heller oder dunkler als die vorherige ist. Wenn man alle Szenen untereinander in beide Richtungen vergleichen möchte, ergibt das 25 Wertungen. Jeder Proband hat dies vier Mal in randomisierter Reihenfolge der Vergleiche wiederholt, so dass es insgesamt 100 Wertungen pro Proband gab.

Die Auswertung richtete sich nach dem „Law of comparative judgment“ von Thurstone und wurde nach der in (Guilford, 1954) vorgezeichneten Methodik durchgeführt. Da normalerweise nicht alle Informationen vorhanden sind, um das Gesetz von Thurstone direkt anzuwenden, wurden von ihm diverse Vereinfachungen und Annahmen getroffen, die er in fünf Cases zusammenfasste. Hier wurde Case V angenommen und die Gültigkeit der dazu nötigen Annahmen mit dem X^2 -Test überprüft.

Die einzelnen Wertungen der Probanden werden in eine Wahrscheinlichkeitsmatrix (siehe Tabelle 5.5) eingetragen, die Aufschluss gibt, wie oft eine bestimmte Szene (horizontal) gegenüber einer anderen Szene (vertikal) als heller bewertet wurde.

Tabelle 5.5 Wahrscheinlichkeitsmatrix des paarweisen Vergleichs

	ii	iii	i	iv	v
ii	-	0,63	0,75	1,00	1,00
iii	0,38	-	0,81	0,88	0,81
i	0,25	0,19	-	0,56	0,88
iv	0,00	0,13	0,44	-	0,69
v	0,00	0,19	0,13	0,31	-

Danach werden die Werte transformiert und können auf einer psychologischen Skala abgebildet werden (Abbildung 5.17). Die psychologische Skala ist eine Intervalskala, d.h. der Nullpunkt kann willkürlich festgelegt werden. In diesem Fall wurde der Nullpunkt so festgelegt, dass eine Leuchtdichte von 0 cd/m^2 einer Null auf der psychologischen Skala R entspricht, wenn man eine Regressionsgerade durch die Werte einzeichnet.

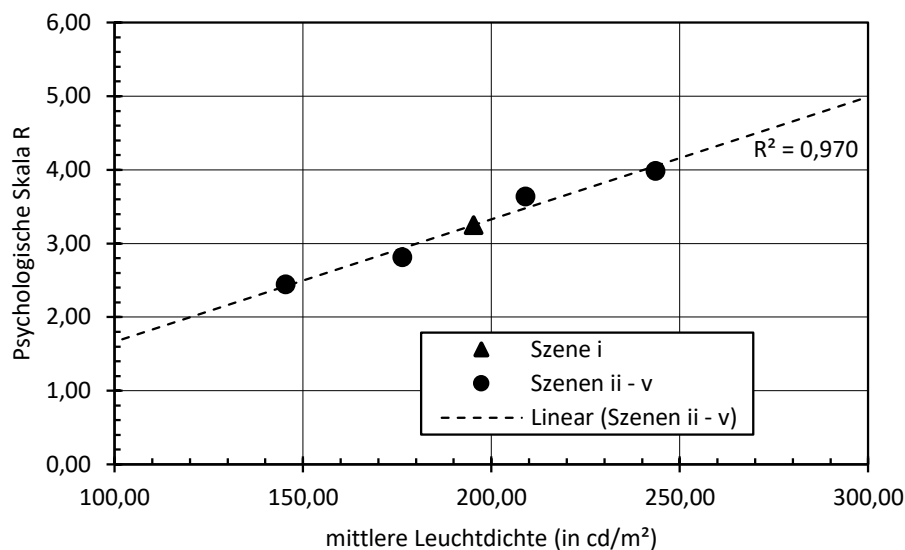


Abbildung 5.17 Helligkeitsbewertungen auf der psychologischen Skala R

Die Kreise in der Abbildung 5.17 markieren die Szenen ii bis v mit einem konstanten Leuchtdichteniveau. Die dynamische Szene i hat nur eine Zuordnung auf der psychologischen Skala. Um ihre äquivalente Leuchtdichte zu ermitteln, wurde eine Regressionsgerade durch die vier konstanten Szenen gelegt und die Szene i darauf abgebildet (dreieckige Markierung). Die Bewertung der dynamischen Szene liegt also zwischen ihrem Initialwert von 40 % und unter ihrem Maximalwert von 50 %.

Dies deutet darauf hin, dass der dynamische Helligkeitsverlauf der Leuchtstofflampen tatsächlich die Helligkeitsbewertung beeinflusst und die Szenen dunkler im Vergleich zu einer Szene mit konstanter Leuchtdichte bewertet werden.

Die Angabe der Probanden, dass sie die Bewertung innerhalb der ersten Sekunden festlegen würden, stimmt allerdings auch nicht. Die Bewertung liegt deutlich über dem Initialwert.

Wenn man das zeitliche Integral über die Szenen bildet und mit der psychologischen Bewertung vergleicht, so zeigt sich eine Korrelation der Daten mit einem $R^2 = 0,96$. Da sich das Verhalten der Leuchtstofflampen nicht ändern lässt, wurde die DALI-Steuerung der LEDs und der Halogenleuchtstofflampen so eingestellt, dass diese Lichtquellen über eine lineare Rampe eingeschaltet werden und nicht sofort auf den eingestellten Endwert springen. Die Zeit der Dimmung wurde auf Grundlage der zeitlichen Integrale der Leuchtstofflampen kalkuliert, um die Verzerrung der Helligkeitsbewertung aufgrund der zeitlichen Dynamik zu vermeiden.

5.3 Größe des Testfelds

Die Wand hat eine Breite von 5,40 m und eine Höhe von 2,45 m. Die Positionierung des Kopfes in 1,20 m Höhe mit einer Entfernung von einem Meter von der Wand bedeutet (siehe Abbildung 5.18 bis Abbildung 5.20), dass die Wand im Raum ein Gesichtsfeld von 134° horizontal und 100° vertikal abdeckt. Dieses Gesichtsfeld entspricht in etwa den Bedingungen beim Helligkeitsempfinden für einen Innenraum. Die Probanden sind während der Versuche angehalten, den Kopf nicht zu bewegen und möglichst geradeaus zu schauen.

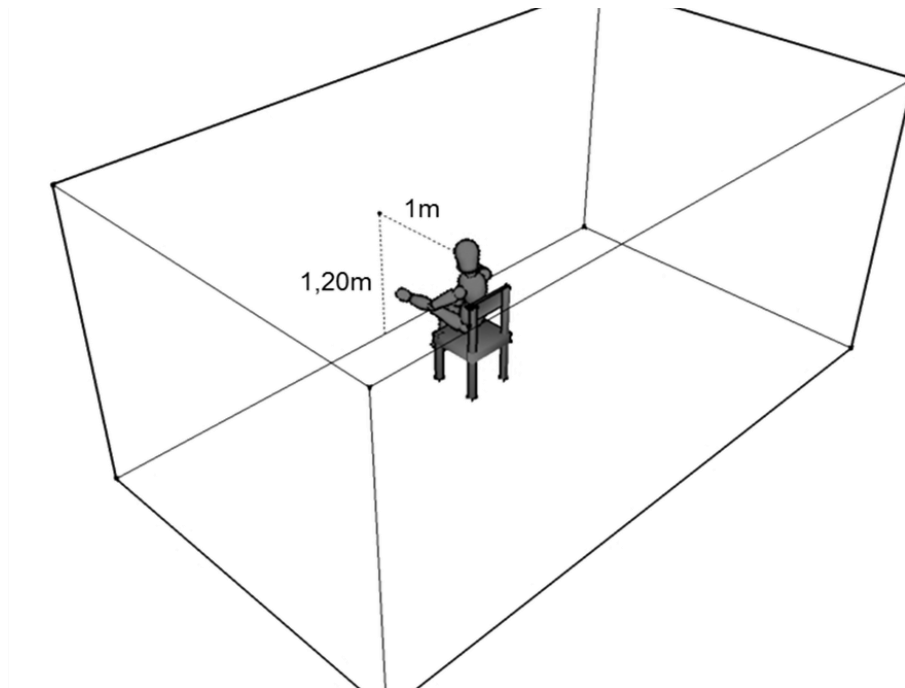


Abbildung 5.18 Position und Blickrichtung des Probanden im Raum

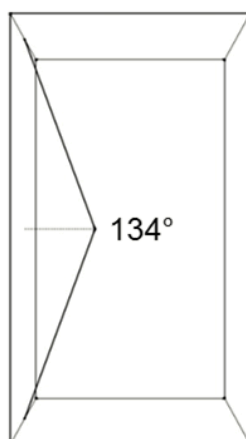


Abbildung 5.19 Ansicht des Raumes von oben

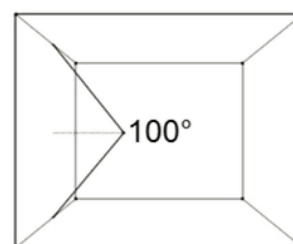


Abbildung 5.20 Ansicht des Raumes seitlich

5.4 Befragungsmethodik

In (CIE TC1-80, 2012) werden vier Methoden zur Messung der Helligkeit beschrieben. In Abbildung 5.21 sind diese Methoden bezüglich des Vorhandenseins des Referenzreizes und der Möglichkeit der Interaktion mit dem Testreiz zusammengefasst.

In dieser Arbeit kommt das Rating-Verfahren zum Einsatz. Die Probanden haben weder eine Referenzszene, mit der die Testszenen verglichen werden sollen, noch können sie die vorgegebenen Einstellungen verändern.

	Absolute measurement No external reference present	Relative measurement Presence of an external reference
Passive No interaction with stimulus	<i>Rating</i>	<i>Discrimination</i>
Active Interaction with stimulus	<i>Adjustment</i>	<i>Matching</i>

Abbildung 5.21 Methoden zur quantitativen Messung der Helligkeit aus (CIE TC1-80, 2012)

Den Probanden werden die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Szenen einzeln zur Beurteilung präsentiert. Die Aufgabe ist dabei die Bewertung der wahrgenommenen Helligkeit der gerade präsentierten Szene auf einer Skala von 0 bis 100. Die Probanden dürfen jede Zahl in diesem Bereich verwenden.

Ohne die Demonstration der oberen und unteren Enden der Skala fällt es den Probanden vor allem am Anfang sehr schwer die präsentierten Szenen auf der Skala einzuordnen, da sie erst die Bewertungskriterien im Laufe der Untersuchung für sich entwickeln müssen (Ankerheuristik). Daher empfiehlt (CIE TC1-80, 2012) die Verwendung von Ankerszenen.

Ausgeschaltetes Licht im Raum wurde als Helligkeit 0 festgelegt. Die Ankerszene mit der Bewertung 100 wurde wie folgt definiert

- Lichtquelle: LED
- Farbtemperatur: neutralweiß
- Mittlere Leuchtdichte von 442 cd/m^2

Die neutralweiße LED wurde für diese Ankerszene ausgewählt, da damit die höchste Leuchtdichte im Raum erreichbar ist und da die LED verglichen mit anderen eingesetzten Lichtquellen die größte Stabilität bezüglich des Farborts aufweist.

Der Proband betrat den Raum mit der eingeschalteten Ankerszene und setzte sich auf den Stuhl. Er bekam vom Testleiter folgende Anweisungen:

- geradeaus zu schauen und Kopfbewegungen möglichst zu vermeiden;
- die gerade eingeschaltete Szene hat die Helligkeit von 100, ausgeschaltetes Licht hat die Helligkeit 0;
- die folgenden Szenen sind zwischen 0 und 100 zu bewerten;
- die Bewertung erfolgt nicht sofort nach dem Einschalten der Szene, sondern nach einer Adaptationszeit auf Nachfrage des Testleiters.

Der Testleiter saß hinter dem Probanden außerhalb seines Sichtfelds und ohne Schatten an die Wand zu werfen. Er befragte und notierte die Bewertungen und schaltete die Szenen.

Um Verzerrungen (Bias) in der Helligkeitsbewertung zu vermeiden, ist die Szenenreihenfolge innerhalb einer Sitzung randomisiert. Es gab keine Sitzung mit gleicher Szenenreihenfolge. Dafür wurde für jede Sitzung am Computer eine zufallsgenerierte Liste der Szenen erstellt, die der Testleiter befolgen musste.

Die Adaptationszeit betrug bei jeder Szene zwei Minuten. Diese Zeit ist sowohl für die Helligkeits- als auch die chromatische Adaptation ausreichend. (Marsden, 1969; CIE TC1-80, 2012; Rinner, et al., 2000; Shevell, 2001)

Damit die Szenen nicht direkt beim Umschalten miteinander verglichen werden können, wurde zwischen den Szenen das Licht für 30 Sekunden ausgeschaltet.

5.5 Probanden

An den Untersuchungen nahmen zwölf Probanden teil. Diese rekrutierten sich sowohl aus den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Fachgebiets Lichttechnik als auch aus Studenten.

In der Tabelle 5.6 sind die Daten der Studienteilnehmer zusammengefasst. Das mittlere Alter der Probanden beträgt 31,8 Jahre mit einer Standardabweichung von 3,8 Jahren. Die Abbildung 5.22 stellt die Verteilung nach Altersstufen grafisch dar.

Wie der Tabelle 5.6 zu entnehmen ist, sind zwei Drittel der Probanden männlich und ein Drittel weiblich. Während keiner der Probanden eine Farbfeldsichtigkeit (Ishihara-Test) aufweist, tragen ein Drittel der Teilnehmer eine Brille. Des Weiteren haben zwei Drittel der Personen eine mehrjährige Erfahrung auf den Gebieten der Lichttechnik und der psychophysischen Wahrnehmungsversuche in diesem Bereich.

Tabelle 5.6: Daten der Probanden

Proband	Alter	Geschlecht	Farbfehl-sichtig-keit	Lichttech. Vor-kenntnisse	Brille
P1	33	m	Nein	Ja	Nein
P2	21	w	Nein	Nein	Ja
P3	35	m	Nein	Ja	Ja
P4	35	m	Nein	Ja	Nein
P5	32	w	Nein	Ja	Nein
P6	30	m	Nein	Nein	Nein
P7	33	m	Nein	Ja	Nein
P8	36	m	Nein	Ja	Nein
P9	31	m	Nein	Ja	Nein
P10	34	w	Nein	Nein	Nein
P11	33	m	Nein	Ja	Ja
P12	29	w	Nein	Nein	Ja

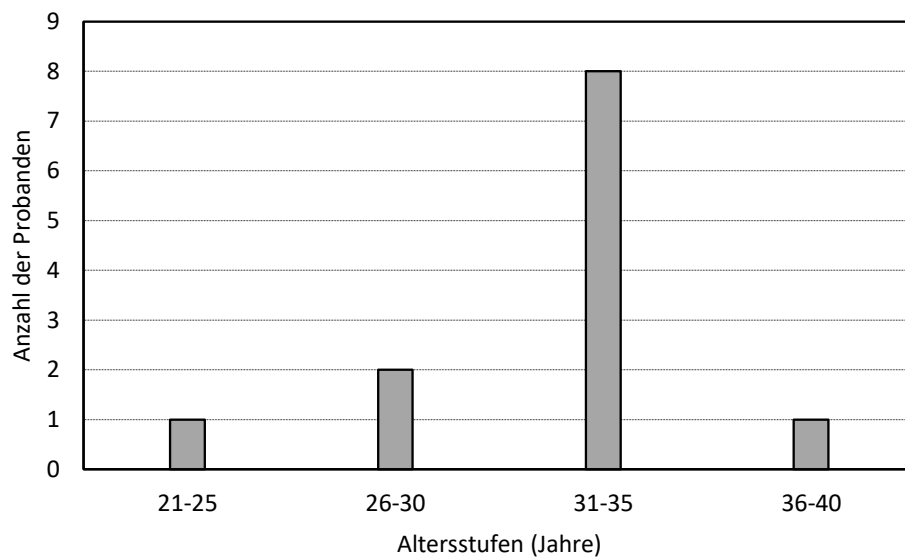


Abbildung 5.22: Altersverteilung der Studienteilnehmer

6 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Befragung vorgestellt und ausgewertet. Die Befragung fand in zwei Stufen statt. An der ersten Befragung nahmen zwölf Probanden jeweils vier Mal (Proband P4 nur drei Mal) teil. Im Anhang 9.2 sind die einzelnen Bewertungen aufgeführt. Diese Ergebnisse werden in der Varianzanalyse, die im Abschnitt 6.3 beschrieben wird, verwendet. Mit der zweiten Befragung wurden weitere Leuchtdichten getestet, um die Datenbasis für die Regressionsanalyse (siehe Abschnitt 6.4) und die folgenden Untersuchungen zu erweitern. Hier nahmen sechs Probanden ebenfalls vier Mal teil. Diese Ergebnisse sind im Anhang 9.3 aufgelistet.

Insgesamt wurden 1081 Einzelwertungen in der ersten und 360 Wertungen in der zweiten Befragung gesammelt.

6.1 Helligkeitsbewertung

Der erste Schritt innerhalb der Auswertung ist die Bildung der Mediane über die Einzelwertungen der einzelnen Probanden. Somit erhält man für einen Probanden dessen Helligkeitsbewertung der einzelnen Szenen, die in den folgenden Berechnungen verwendet wird.

In den folgenden Abbildungen sind die Helligkeitsbewertungen der Lichtquellen für die eingestellten mittleren Leuchtdichten als Box-Plots dargestellt. Wie im Abschnitt 5.4 beschrieben, entsprechen die Bewertungen 0 und 100 dem ausgeschalteten Licht bzw. der mittleren Leuchtdichte von 442 cd/m^2 . Der Querstrich in der Box ist der Median der Bewertungen durch die zwölf Probanden. Die obere und untere Begrenzung der Box sind die Quartile. Die Whisker stellen das Maximum und Minimum in der Bewertung dar. Die arithmetischen Mittelwerte sind als Kreuze eingezeichnet.

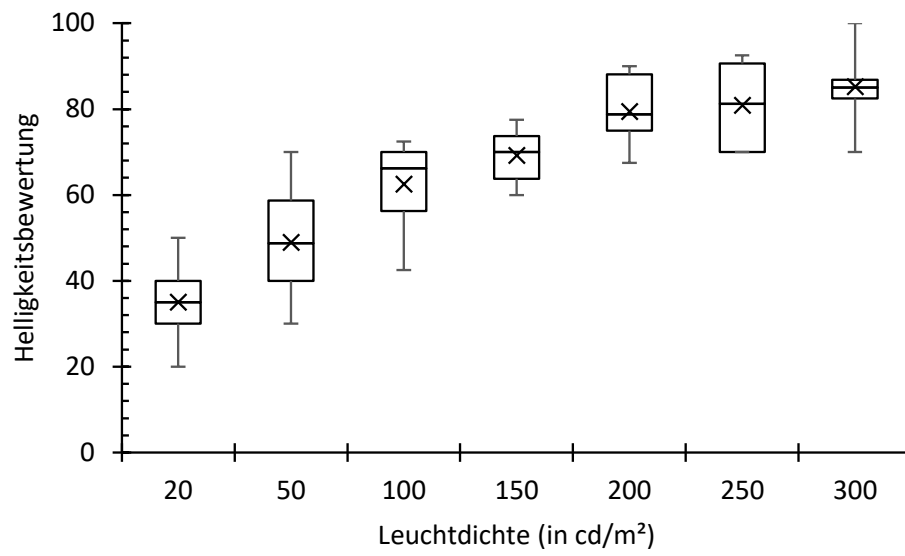


Abbildung 6.1 Helligkeitsbewertung der mit Halogenglühlampen beleuchteten Szenen

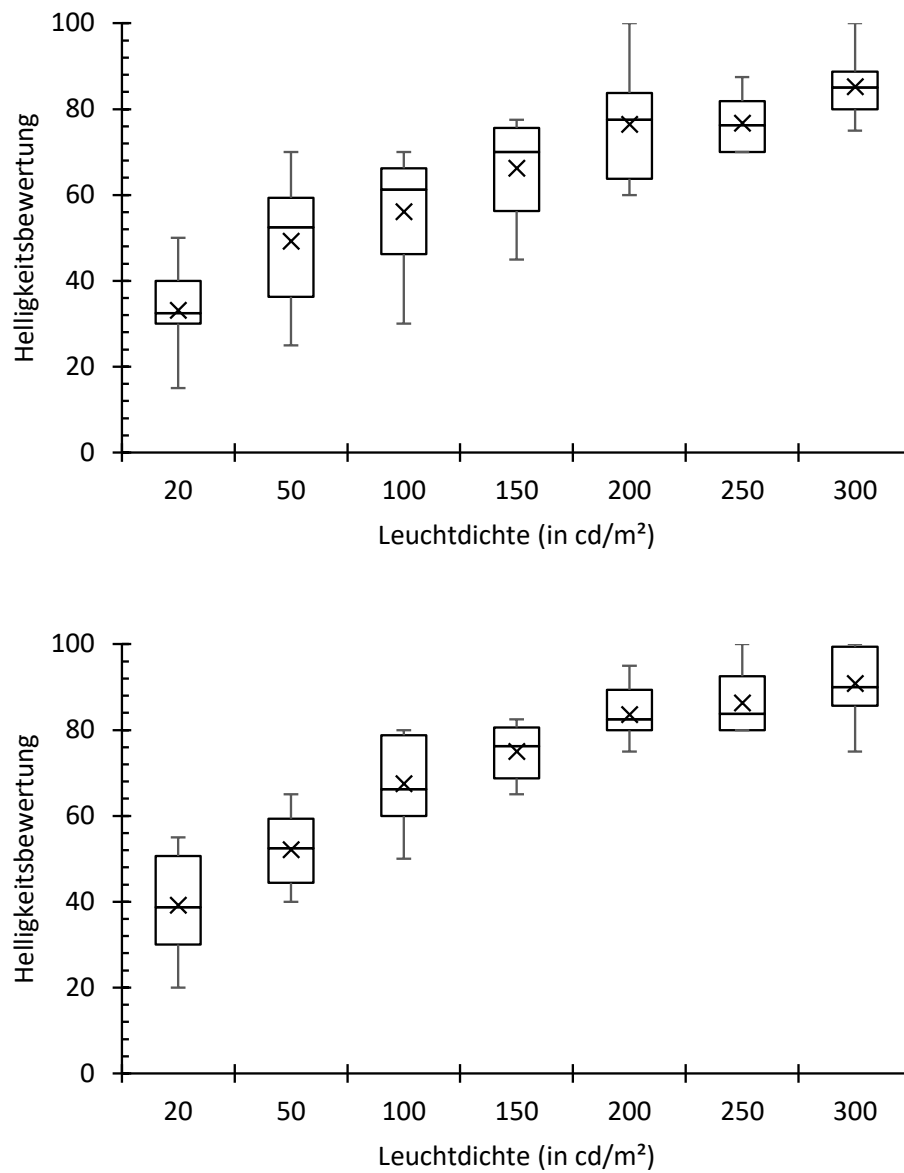


Abbildung 6.2 Helligkeitsbewertung der Szenen mit der warmweißen (oben) und neutralweißen (unten) LED-Beleuchtung

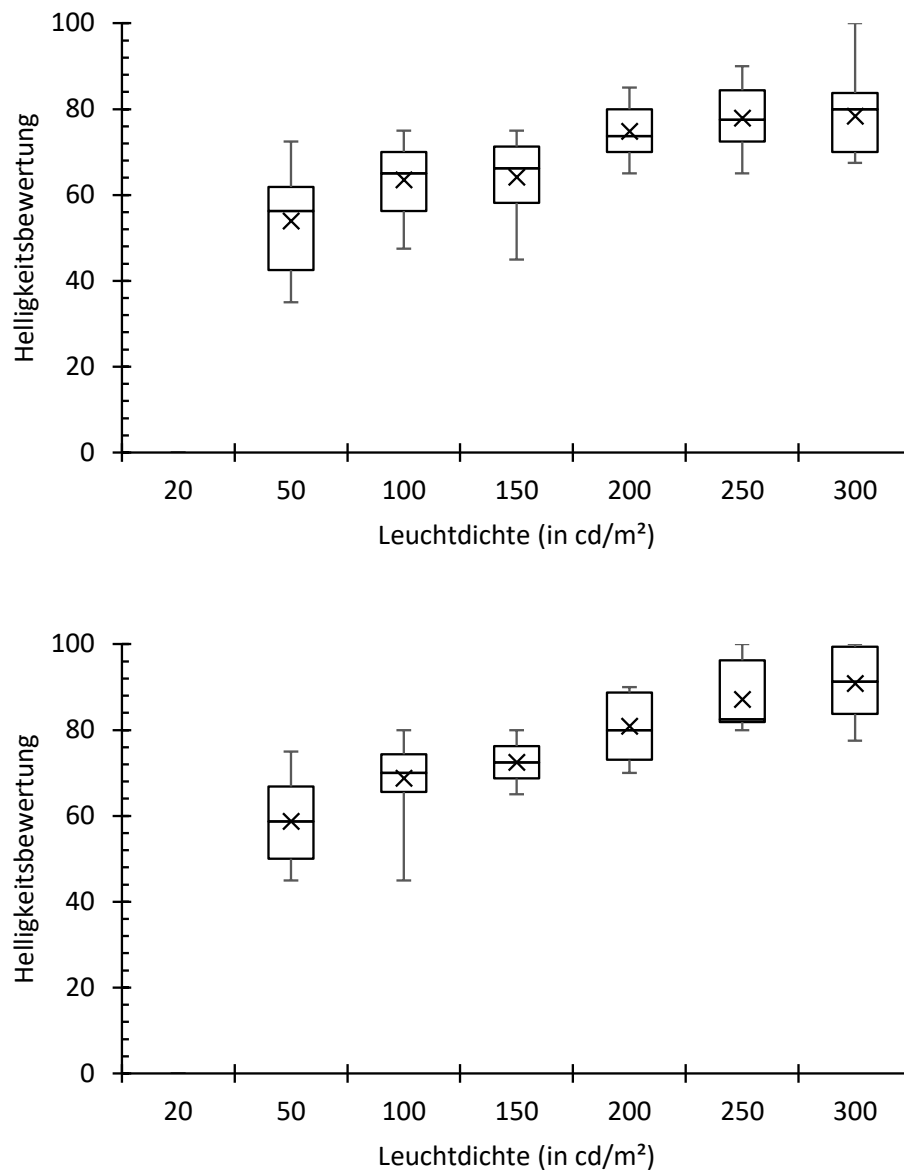


Abbildung 6.3 Helligkeitsbewertung der Szenen mit der warmweißen (oben) und neutralweißen (unten) Beleuchtung mit Leuchtstofflampen

Tabelle 6.1 fasst die Mittelwerte und die Standardabweichungen für die einzelnen Szenen zusammen.

Tabelle 6.1 Bewertung der Szenen mit warm- und neutralweißen Lichtquellen

Erste Befragung			Zweite Befragung		
Szene	Mittelwert	Standard-abweichung	Szene	Mittelwert	Standard-abweichung
HAL 20	35,00	7,84			
HAL 50	48,96	11,01			
HAL 100	62,50	9,68	HAL 100	55,83	11,70
HAL 200	79,38	7,30	HAL 150	69,17	5,53
HAL 300	85,21	7,39	HAL 250	80,83	8,74
LED27 20	33,13	9,19			
LED27 50	49,17	12,84			
LED27 100	56,04	11,97	LED27 100	59,17	11,24
LED27 200	76,46	12,05	LED27 150	66,25	11,06
LED27 300	85,21	6,65	LED27 250	76,67	6,07
LL27 50	53,96	10,82			
LL27 100	63,54	7,94	LL27 100	55,00	10,90
LL27 200	74,79	5,72	LL27 150	64,17	9,43
LL27 300	78,33	8,92	LL27 250	77,92	7,69
LED40 20	39,17	10,67			
LED40 50	52,08	7,83			
LED40 100	67,50	9,41	LED40 100	62,50	10,10
LED40 200	83,54	5,90	LED40 150	75,00	6,29
LED40 300	90,83	8,25	LED40 250	86,25	7,03
LL40 50	58,75	9,38			
LL40 100	68,75	8,45	LL40 100	62,92	8,83
LL40 200	80,83	6,95	LL40 150	72,50	4,56
LL40 300	90,83	7,66	LL40 250	87,08	7,56

In der Abbildung 6.4 sind diese Ergebnisse der beiden Befragungen graphisch dargestellt. Zu erkennen ist zum einen der nichtlineare Zusammenhang zwischen der Helligkeitswahrnehmung und der Leuchtdichte der präsentierten Szene. Zum anderen liegen die Wertungen der neutralweißen Szenen (LED40 und LL40) am oberen Rand der Punktwolke, während die der warmweißen Szenen (HAL, LED27 und LL27) sich eher am unteren Rand befinden.

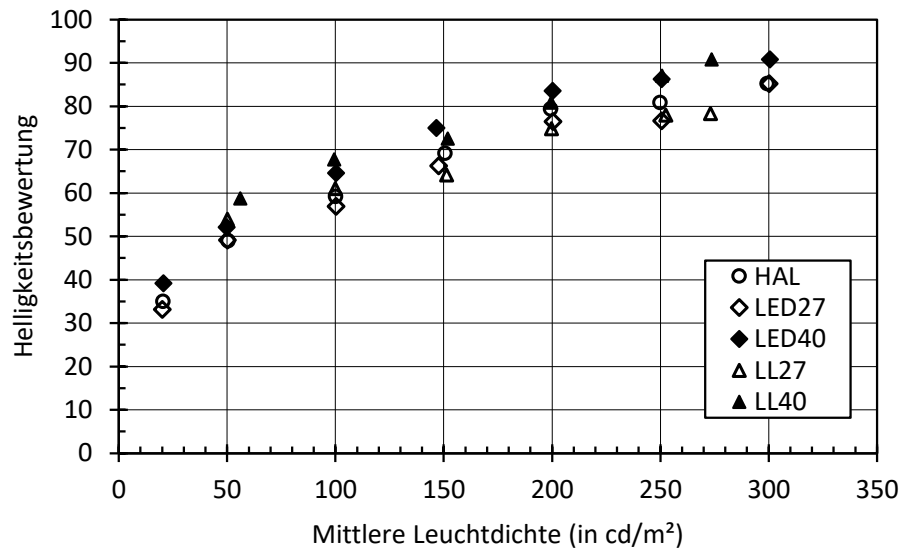


Abbildung 6.4 Helligkeitsbewertungen der dargebotenen Szenen in Abhängigkeit der mittleren Leuchtdichte für die verwendeten Lichtquellen

6.2 Normalverteilung und Varianzhomogenität

Die Varianz- und Regressionsanalyse haben einige Voraussetzungen, die für die Validität der Auswertung von Bedeutung sind. Dies sind nach (Sedlmeier, et al., 2008)

- die Normalverteilung der Residuen und
- die Varianzhomogenität.

Die Untersuchung der Normalverteilung der Probandenwertungen der einzelnen Szenen ist mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests durchgeführt worden. Die Nullhypothese H_0 ist die Annahme der Normalverteilung der Daten. Die Alternativhypothese H_1 unterstellt dagegen, dass keine Normalverteilung vorliegt.

Ergebnis des Tests ist bis auf zwei Szenen (LL40 100 und LL40 250) die Ablehnung der Alternativhypothese ($p > 0,05$) und damit die Annahme der Nullhypothese. Daher werden die Daten im Folgenden in ihrer Gesamtheit als normalverteilt angenommen.

Die Varianzhomogenität (Homoskedastizität) liegt vor, wenn die Varianz der Residuen für alle Ausprägungen der Prädiktorvariablen – in unserem Fall der Leuchtdichte – nicht signifikant unterschiedlich ist. Die unterschiedliche Streuung innerhalb der Datenmessung heißt dem entsprechend Heteroskedastizität.

Auf diese Untersuchung übertragen, würde das bedeuten, dass beispielsweise die Streuung der Probandenwertungen mit der Leuchtdichte zusammen zu- oder abnimmt bzw. die Wertungen in der Mitte des untersuchten Leuchtdichtebereichs eine größere bzw. kleinere Streuung als am Rand haben.

Die Konsequenz für die Varianzanalyse wäre die höhere Wahrscheinlichkeit für die Annahme der falschen Hypothese, da die Stichprobenverteilung der von uns errechneten Prüfgröße (F-Wert) nicht der F-Verteilung gleicht.

Für die Regressionsanalyse bedeutet die Heteroskedastizität, dass die Kleinstquadratmethode nicht zu einem linearen erwartungstreuen Schätzer minimaler Varianz führt.

Der verwendete Test auf die Gleichheit der Varianzen ist der Levene-Test. Die Nullhypothese H_0 geht davon aus, dass die Varianzen gleich sind. Die Alternativhypothese H_1 lehnt das ab.

Wenn sich der Signifikanzwert des Tests unter einem zuvor bestimmten Niveau ($p < 0,05$) befindet, so sind die Varianzen der Stichproben signifikant unterschiedlich und die Nullhypothese der Varianzgleichheit kann abgelehnt werden. Dies ist in dieser Untersuchung nicht der Fall ($p = 0,55$). Die Varianzhomogenität liegt also vor.

6.3 Varianzanalyse

Die Abhängigkeit der Helligkeitsbewertung der Probanden von den unterschiedlichen Parametern wird hier mit Hilfe der Varianzanalyse (ANOVA – ANalysis Of VAriance) untersucht. Die Varianzanalyse dient dazu, die Unterschiede zwischen den Mittelwerten auf Signifikanz zu testen. Sie wird dann eingesetzt, wenn Mittelwerte aus mehr als zwei Stichproben zu vergleichen sind, was in unserem Fall beispielsweise für die Leuchtdichteabstufungen in den bewerteten Szenen zutrifft. Das statistische Verfahren innerhalb der Varianzanalyse ist der F-Test.

Da die Bewertungen nicht jeweils von unterschiedlichen Personen gemacht wurden, sondern alle Probanden alle Szenen bewertet haben und die Abhängigkeit der Bewertung von mehreren Parametern gleichzeitig untersucht wird, handelt es sich hier um eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit abhängigen Stichproben.

Als abhängige Variable wird die gemittelte Helligkeitsbewertung der Szenen angenommen (siehe Abschnitt 6.1). Als unabhängige Faktoren werden folgende Parameter der bewerteten Szenen mit jeweiligen Ausprägungen verwendet:

- Probanden P
 - P1 bis P12
- Typ der Lichtquelle LQ
 - HAL – Halogenglühlampe
 - LED – Leuchtdiode
 - LL – Leuchtstofflampe
- Farbtemperatur T
 - ww – warmweiß mit 2700 K
 - nw – neutralweiß mit 4000 K
- Mittlere Leuchtdichte L
 - 50 cd/m²
 - 100 cd/m²
 - 200 cd/m²
 - 300 cd/m²

Die multifaktorielle ANOVA verlangt, dass von allen Ausprägungen der einzelnen Faktoren alle Kombinationen getestet werden. Die Szenen mit der mittleren Leuchtdichte von 20 cd/m² werden daher hier ausgelassen, da diese Leuchtdichte mit den Leuchtstofflampen unter Beibehaltung der Lichtverteilung nicht realisierbar war.

Des Weiteren muss die Varianzanalyse in zwei Schritten durchgeführt werden, da mit Halogenglühlampen beleuchtete Szenen keine neutralweiße Farbtemperatur aufweisen können. Daher wird als Erstes die Abhängigkeit der Helligkeitsbewertung von Leuchtdioden und Leuchtstofflampen mit warmweißen und neutralweißen Farbtemperaturen getestet. Danach wird die Varianzanalyse nochmal mit allen drei Lichtquellentypen, aber ohne die Szenen mit neutralweißer Beleuchtung durchgeführt, um den eventuellen Unterschied zwischen der Halogenglühlampe und den anderen beiden warmweißen Lichtquellen zu testen.

Die Hypothesen für die erste Varianzanalyse ohne Berücksichtigung der Glühlampen sind:

$$H_0 \text{ für den Faktor } LQ: \quad 6.1$$

$$\mu_{LED..} = \mu_{LL..}$$

$$H_0 \text{ für den Faktor } T: \quad 6.2$$

$$\mu_{.ww.} = \mu_{.nw.}$$

$$H_0 \text{ für den Faktor } L: \quad 6.3$$

$$\mu_{..50} = \mu_{..100} = \mu_{..200} = \mu_{..300}$$

Die Alternativhypothesen H_1 gehen jeweils davon aus, dass die Mittelwerte unterschiedlich sind. Bei einer mehrfaktoriellen Analyse werden auch die Interaktionen betrachtet. Da immer die gleichen Probanden die Szenen beurteilt haben, sind die Stichproben von den jeweiligen Probanden abhängig und werden in der Analyse auf die jeweilige Interaktion bezogen. Die Varianz der Lichtquellen wird auf die Interaktion $P \times LQ$ und nicht auf den Gesamtfehler, wie dies bei unabhängigen Stichproben der Fall ist, bezogen. Weitere Interaktionen haben in dieser Untersuchung nur eine geringe Effektstärke und werden daher nicht weiter betrachtet.

Tabelle 6.2 stellt die Ergebnisse der ANOVA dar. Aus der Analyse geht hervor, dass der Typ der Lichtquelle keinen Einfluss auf die wahrgenommene Helligkeit hat ($p_{LQ} = 0,388$). Der Einfluss der Farbtemperatur und der Leuchtdichte sind dagegen mit jeweils $p_T = 0,004$ und $p_L < 0,001$ höchst signifikant.

Tabelle 6.2 ANOVA-Tabelle (ohne Halogenglühlampen)

Varianzquelle	QS	df	Varianzschätzung	F-Wert	p-Wert
Proband P	7096,19	11	645,11		
Lichtquelle LQ	60,19	1	60,19	0,81	0,388
Farbtemperatur T	2382,39	1	2382,39	12,74	0,004
Leuchtdichte L	31315,72	3	10438,57	98,54	<0,001
Interaktion $P \times LQ$	819,11	11	74,46		
Interaktion $P \times T$	2057,06	11	187,01		
Interaktion $P \times L$	3495,61	33	105,93		
Sonstige Interaktionen und Fehler	3407,81	120	28,40		
Gesamt	50634,08	191			

QS: Quadratsumme; df: Freiheitsgrad

Die Hypothesen für die zweite Varianzanalyse, nun mit der Berücksichtigung der Glühlampen, aber ohne die neutralweiße Beleuchtung, sind:

$$H_0 \text{ für den Faktor } LQ: \quad 6.4$$

$$\mu_{LED \cdot} = \mu_{LL \cdot} = \mu_{HAL \cdot}$$

$$H_0 \text{ für den Faktor } L: \quad 6.5$$

$$\mu_{\cdot 50} = \mu_{\cdot 100} = \mu_{\cdot 200} = \mu_{\cdot 300}$$

Die Alternativhypothesen H_1 gehen jeweils davon aus, dass die Mittelwerte unterschiedlich sind.

Die Ergebnisse dieser Analyse sind in der Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Tabelle 6.3 ANOVA-Tabelle (ohne neutralweiße Beleuchtung)

Varianzquelle	QS	df	Varianzschätzung	F-Wert	p-Wert
Proband P	10800,64	11	981,88		
Lichtquelle LQ	127,43	2	63,72	1,13	0,341
Leuchtdichte L	7847,50	3	2615,83	45,02	<0,001
Interaktion $P \times LQ$	1239,24	22	56,33		
Interaktion $P \times L$	1917,40	33	58,10		
Sonstige Interaktionen und Fehler	16061,50	72	223,08		
Gesamt	37993,71	143			

QS: Quadratsumme; df: Freiheitsgrad

Es zeigt sich, dass auch hier die Hypothese aus der Gleichung 6.4 zutrifft und die Lichtquelle die Bewertung der Helligkeit nicht beeinflusst ($p_{LQ} = 0,341$). Höchst signifikant bleibt mit $p_L < 0,001$ der Einfluss der unterschiedlichen Leuchtdichten.

Zusammenfassend kann man nun davon ausgehen, dass für Lichtquellentyp in dieser Untersuchung kein Einfluss auf die Helligkeitswahrnehmung nachgewiesen werden konnte. Die Farbtemperatur und erwartungsgemäß die Leuchtdichte bestimmen hier die Wahrnehmung.

Der Einfluss der Farbtemperatur auf die Helligkeitswahrnehmung ist ein weiterer Faktor der mit der Varianzanalyse untersucht werden kann.

Wie die spektrale Charakterisierung des Lichts gezeigt hat, ändert sich die Farbwiedergabe kaum, wenn die Leuchten gedimmt werden (siehe Abschnitt 5.2.2). Alle Lichtquellen können dabei in drei Gruppen an Farbwiedergabewerten eingeteilt werden, was auch der Einteilung nach Lichtquellen (unabhängig der Farbtemperatur) entspricht. Die Tabelle 6.4 verdeutlicht dies.

Tabelle 6.4 Farbwiedergabewerte der eingesetzten Lichtquellen

Halogenglühlampen	Leuchtdioden	Leuchtstofflampen
$R_a = 100$	$R_a = 89$	$R_a = 82$

In der Analyse kann daher der Faktor „Lichtquelle“ durch „Farbwiedergabe“ und ihre Ausprägungen ersetzt werden und bedarf keiner gesonderten Berechnung. Das formale Ergebnis der Analyse wird dadurch nicht verändert. Daraus kann geschlossen werden, dass auch die Farbwiedergabe in diesem Versuch keinen signifikanten Einfluss auf die Helligkeitsbewertung hat.

6.4 Regressionsanalyse

Mit Hilfe der Varianzanalyse kann untersucht werden, ob bestimmte Faktoren die abhängigen Variablen signifikant beeinflussen oder nicht. Die Analyse erlaubt aber keinen Rückschluss auf die Art und Weise des Zusammenhangs. Dies wird in diesem Abschnitt mittels der linearen Regression untersucht.

Es wird hier der Zusammenhang zwischen der mittleren Szenenleuchtdichte und der Probandenbewertung unter der Berücksichtigung weiterer Kennwerte gesucht. Die Varianzanalyse hat gezeigt, dass die Farbtemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung hat, wohingegen die unterschiedlichen Lichtquellentypen keine Rolle spielen. Daher wird in der Regressionsanalyse nur noch die unterschiedliche Farbtemperatur weiter betrachtet und die Daten unterschiedlicher Lichtquellen können unter ihrer jeweiligen Farbtemperatur zusammengefasst werden.

Als erstes wird festgelegt, dass die Helligkeitsbewertung in der Analyse das *Kriterium* H und die mittlere Leuchtdichte der *Prädiktor* L ist. Es werden nun zwei Geraden gesucht, die die Daten in der Punktwolke in der Abbildung 6.4 am besten repräsentieren. Die Geraden haben mit den Regressionskoeffizienten a (Ordinatenabschnitt) und b (Steigung) die folgende Form:

$$H_{nw} = b_{nw} \cdot L + a_{nw} \quad 6.6$$

$$H_{ww} = b_{ww} \cdot L + a_{ww} \quad 6.7$$

Aufgrund der Festlegung der Ankerszene, die die Bewertung 0 mit dem ausgeschalteten Licht gleichsetzt, können die Ordinatenabschnitte

$$a_{nw} = a_{ww} = 0 \quad 6.8$$

gesetzt werden.

Die Geradengleichungen werden mittels der Methode der kleinsten Quadrate an die Werte angepasst. Die Regressionsgerade ist diejenige Gerade, für die die Summe der quadrierten Vorhersagefehler minimal wird.

Wie Abbildung 6.4 zeigt, ist der Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte und der Bewertung durch die Probanden nicht linear. Das Anpassen der Geradengleichungen direkt an diese Daten würde systematisch zu verzerrten Regressionskoeffizienten führen.

Wenn die Daten eine monotone Krümmung aufweisen, kann eine Potenzleiter zur Linearisierung verwendet werden. Dies ist hier der Fall. Das Ziel ist hierbei die Art des Zusammenhangs der beiden Variablen festzustellen und die Kurve durch die Wertetransformation zu begradigen. Dabei wird bei einer Variablen der Exponent n entweder erhöht oder erniedrigt. (Sedlmeier, et al., 2008)

Dieses Verfahren wird auf den Prädiktor L angewendet. Danach werden mittels der Methode der kleinsten Quadrate die Regressionsgerade und der dazugehörige Standardschätzfehler s_e bestimmt. Die Gleichungen für den Zusammenhang zwischen H und L müssen daher auf folgende Weise angepasst werden

$$H_{nw} = b_{nw} \cdot L^n \quad 6.9$$

$$H_{ww} = b_{ww} \cdot L^n \quad 6.10$$

Als Gütemaß für die Anpassung der Regressionsgeraden an die Daten wird in dieser Arbeit der Standardschätzfehler verwendet. Er gibt an, wie stark die durch die Regressionsgerade vorhergesagten Werte um die tatsächlichen Werte im Mittel streuen. Je kleiner der Standardschätzfehler ist, umso weniger weichen die tatsächlichen Werte von der Regressionsgeraden ab. Die Formel für die Berechnung des Standardschätzfehlers ist

$$s_e = s_H \sqrt{1 - r^2} \quad 6.11$$

mit s_H der Standardabweichung des Kriteriums H und dem Korrelationskoeffizient r zwischen dem Kriterium und Prädiktor.

Die Standardschätzfehler für unterschiedliche Exponenten sind in der Abbildung 6.5 dargestellt. Das Minimum der Kurven liegt für die beiden Farbtemperaturen bei $n = 0,30$ mit $s_{e,nw} = 2,0$ und $s_{e,ww} = 3,1$.

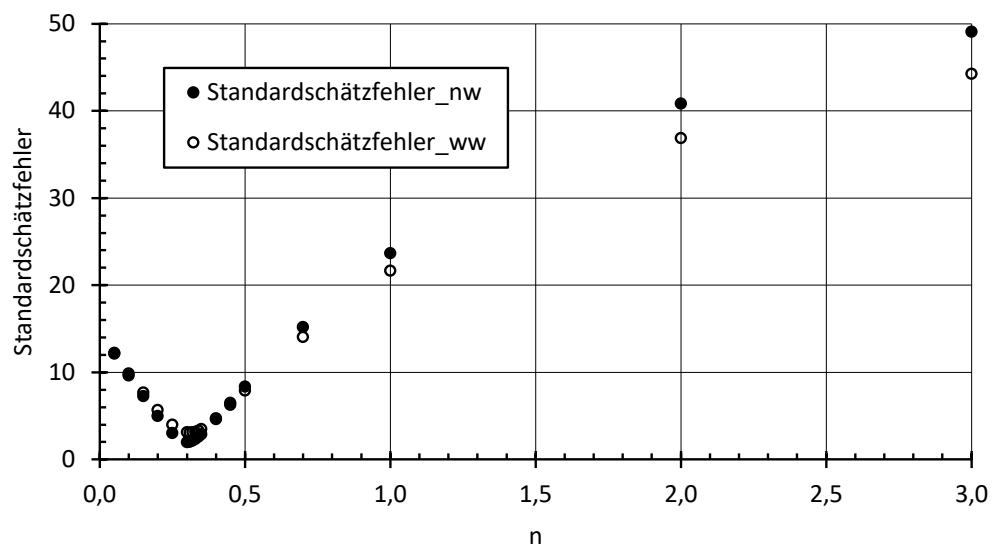


Abbildung 6.5 Potenzleiter zur Suche des optimalen Exponenten

In der Abbildung 6.6 sind die Helligkeitswertungen über der transformierten Abszisse mit den Regressionsgeraden dargestellt. Die Abbildung 6.7 stellt den gleichen Zusammenhang entzerrt in Abhängigkeit der Leuchtdichte dar.

Die Daten werden dabei durch die folgenden zwei Gleichungen am besten beschrieben.

$$H_{nw} = 16,53 \cdot L^{0,3} \quad 6.12$$

$$H_{ww} = 15,08 \cdot L^{0,3} \quad 6.13$$

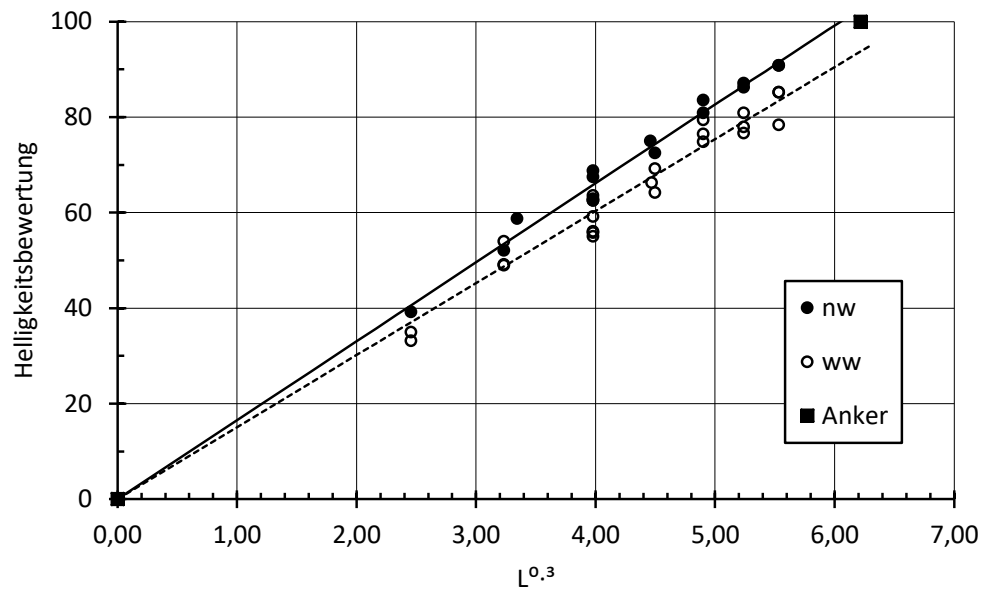


Abbildung 6.6 Lineare Regression mit der transformierten Abszisse

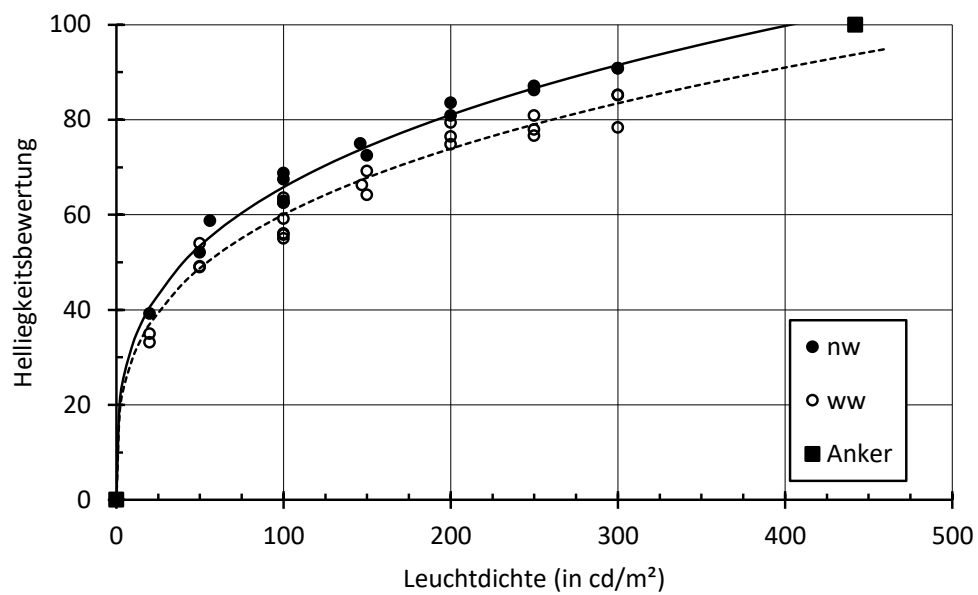


Abbildung 6.7 Zusammenhang zwischen der Wandleuchtdichte und der Helligkeitsbewertung durch Probanden

6.5 Anwendung der Helligkeitsmodelle

Ein Modell, das die optische Strahlung bezüglich der Helligkeitswahrnehmung richtig gewichtet, sollte für zwei zu vergleichende Reize unabhängig vom Farbort bzw. der Farbtemperatur die gleiche äquivalente Leuchtdichte ermitteln, wenn sie gleich hell erscheinen bzw. bewertet werden.

Daher werden für die hier beschriebenen Ergebnisse der Helligkeitsbewertungen nicht mehr nach Lichtquellentypen und Farbtemperaturen gruppiert, sondern als Ganzes der Regressionsanalyse unterzogen.

Die Werte des Prädiktors L , der im vorherigen Abschnitt die gemessenen mittleren Leuchtdichten an der Wand repräsentierte, werden durch Folgendes ersetzt:

- Leuchtdichten auf Basis der $y_{10}(\lambda)$ - und $V_M(\lambda)$ -Funktionen
- Äquivalente Leuchtdichten nach den Modellen aus den CIE 141- und CIE 200-Publikationen von 2001 bzw. 2011
- *Brightness Lumens* von Berman und *SWS Lumens* von Fotios aus den Jahren 1995 und 1998

Die äquivalenten Leuchtdichten, die auf Grundlage der gemessenen Leuchtdichten und der spektralen Strahldichten an der Wand kalkuliert wurden, sind im Anhang 9.4 aufgeführt.

Der Regressionskoeffizient a wird weiterhin auf Null gesetzt und der Exponent bleibt $n = 0,3$. Als Gütekriterium, um die Modelle zu vergleichen, wird der Standardschätzfehler s_e verwendet. Dies scheint das geeignete Maß zu sein, da das am besten funktionierende Modell die Streuung der einzelnen Punkte reduzieren soll.

Die Abbildung 6.8 stellt die in der Tabelle 6.5 aufgeführten Standardschätzfehler für die einzelnen Modelle graphisch dar.

Die Bewertung mit der $V(\lambda)$ -Funktion und der modifizierten Funktion $V_M(\lambda)$ führen zu einem nahezu identischen Fehler. Die Bewertung mit der Funktion $y_{10}(\lambda)$ für die Sehwinkel von 10° reduziert dagegen die Streuung der Datenpunkte leicht und hat mit 3,83 einen etwas geringeren Standardschätzfehler zur Folge.

Die 2° -basierten Helligkeitsmodelle zeigen ein zur $V(\lambda)$ -Bewertung ähnliches Ergebnis, mit Ausnahme des Modells von Nakano, das die Streuung der Daten tendenziell weiter erhöht.

Dementsprechend zeigen die 10° -basierten Modelle, mit Ausnahme der Modelle von Sagawa-Takeichi und Nakano-Ikeda, die gleichen Ergebnisse im Vergleich zur Strahlungsbewertung mit der $y_{10}(\lambda)$ -Funktion.

Die Bewertung der optischen Strahlung mit dem Supplementär-Photometriesystem nach dem CIE 200-Report führt ebenfalls zu keiner Verringerung der Streuung der Datenpunkte um die

entsprechend kalkulierte Regressionsgerade. Dies führt zu einem höheren Standardschätzfehler als bei der $V(\lambda)$ -Bewertung, obwohl beide für 2°-Sehfelder gelten.

Tabelle 6.5 Ergebnisse der Regressionsanalyse für die betrachteten Helligkeitsmodelle

	Modell	Standardschätzfehler s_e	Regressionskoeffizient b
	$V(\lambda)$	3,95	15,68
	$y_{10}(\lambda)$	3,83	15,45
	$V_m(\lambda)$	3,94	15,67
2°-Modelle	Ware-Cowan	3,94	16,21
	Guth	4,02	15,92
	Yaguchi-Ikeda	4,00	15,48
	Nakano	4,83	15,23
10°-Modelle	Palmer 1st	3,83	15,45
	Palmer 2nd	3,81	15,44
	Sagawa-Takeichi	4,36	16,22
	Nakano-Ikeda	4,702	15,38
	Kokoschka-Bodmann	3,84	15,21
	Trezona	3,84	16,48
	CIE 200	4,57	16,21
	<i>Brightness Lumens</i>	2,68	14,99
	<i>SWS Lumens</i>	2,56	17,63

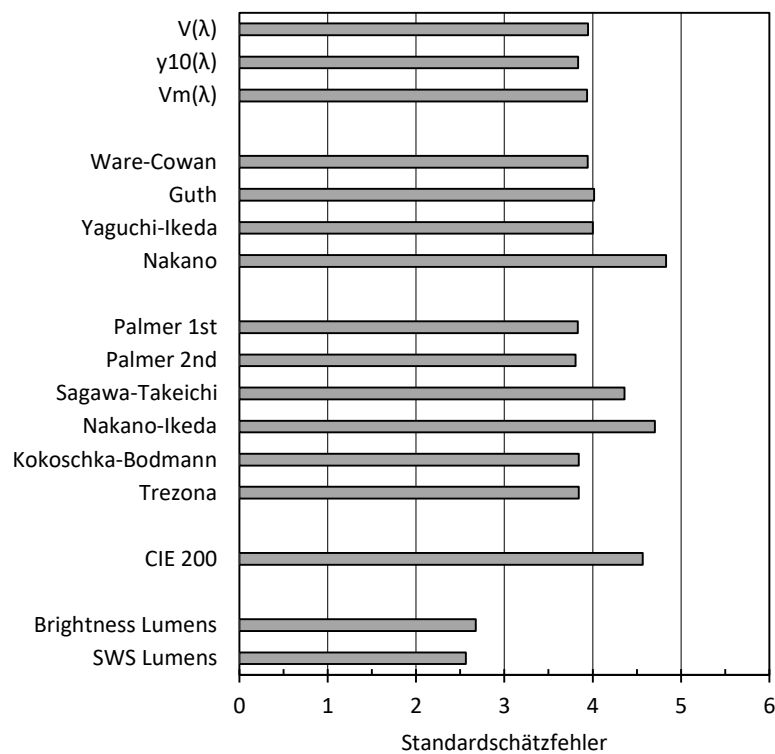


Abbildung 6.8 Standardschätzfehler der betrachteten Helligkeitsmodelle

Die Helligkeitsmodelle sowohl von Berman als auch mit einer weiteren Verbesserung von Fotios führen hingegen zu einer deutlichen Verringerung der Standardschätzfehler mit $s_{e,Berman} = 2,68$ und $s_{e,Fotios} = 2,56$. Also kann die Hypothese 2 aus Kapitel 4.8 als erwiesen angesehen werden.

Die Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 zeigen den Unterschied zwischen der Streuung der Datenpunkte auf Grundlage der photopischen Leuchtdichte und SWS Lumens, als Modell mit dem geringsten Standardschätzfehler aller getesteten Modelle.

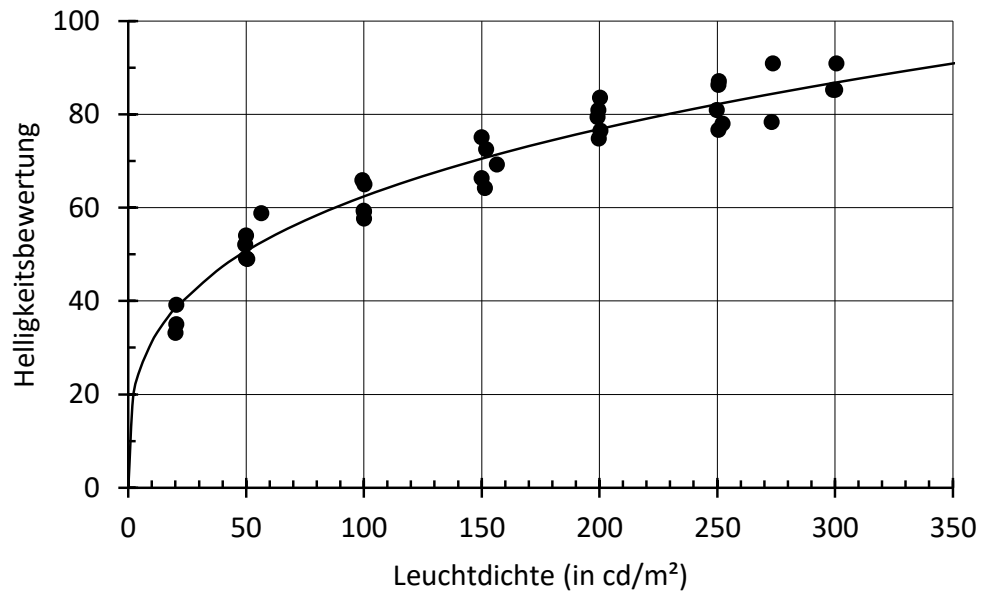


Abbildung 6.9 Helligkeitsbewertung in Abhängigkeit der $V(\lambda)$ -bewerteten Leuchtdichte

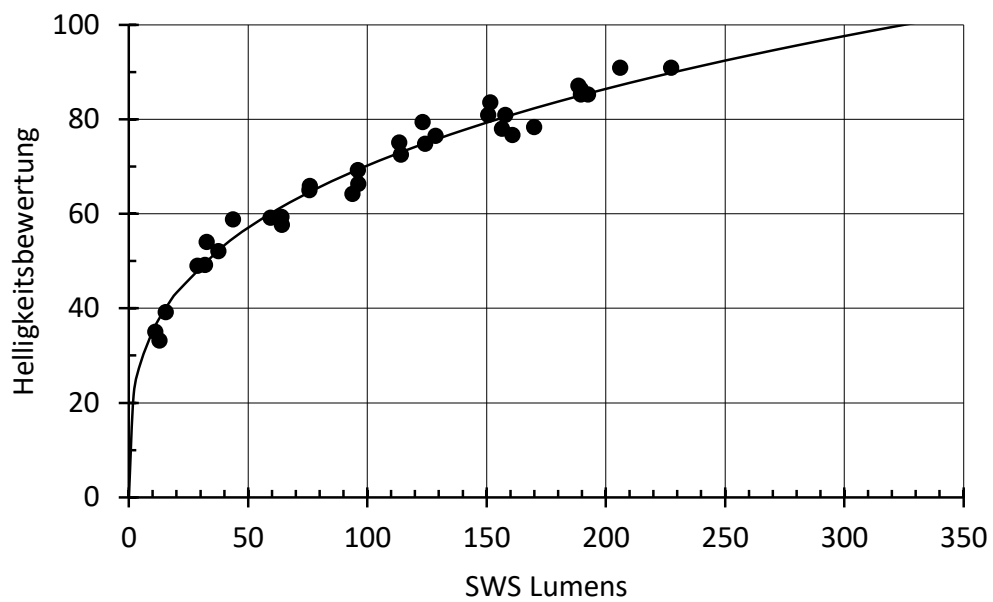


Abbildung 6.10 Helligkeitsbewertung in Abhängigkeit der SWS Lumens nach Fotios

6.6 Interpersonelle Unterschiede

In den Abschnitten 6.3 bis 6.5 wurden die Bewertungen für alle Probanden gemeinsam ausgewertet. In diesem Abschnitt wird die Varianzanalyse auf jeden einzelnen Probanden angewendet. Als Datengrundlage dienen hierbei die vier Bewertungen der Szenen durch die einzelnen Probanden.

Als Einschränkung wird vorangestellt, dass auf dieser Grundlage weder die Normalverteilung noch die Varianzhomogenität vorliegen. Die Ergebnisse werden deshalb schon ab $p = 0,1$ als signifikant betrachtet. Deshalb sind die hier gewonnenen Erkenntnisse mit Vorsicht zu betrachten.

Bis auf einen Probanden (P10 mit $p_L = 0,317$) zeigen alle Probanden einen signifikanten Einfluss der mittleren Leuchtdichte auf die Bewertung der Helligkeit.

Bezüglich der ähnlichsten Farbtemperatur T können die Probanden in zwei Gruppen mit jeweils sechs Probanden aufgeteilt werden. In der Tabelle 6.6 sind die p -Werte für die einzelnen Probanden dargestellt. Die Probanden, die ein $p_T > 0,1$ aufweisen, werden der Gruppe A zugeteilt, die keine Beeinflussung durch die Farbtemperatur aufweist. Probanden mit $p_T < 0,1$ werden zu B eingruppiert.

Die anschließende, nach den beiden Gruppen getrennte Regressionsanalyse liefert Regressionskoeffizienten, die in der Tabelle 6.7 zusammengefasst sind. Die nachfolgenden Graphiken auf Seite 85 stellen die entsprechenden Regressionsgeraden dar.

Tabelle 6.6 Signifikanz des Einflusses der Farbtemperatur auf die Helligkeitswahrnehmung einzelner Probanden

Proband	p_T	Gruppe
P1	0,960	A
P2	0,058	B
P3	0,003	B
P4	0,881	A
P5	0,322	A
P6	0,058	B
P7	0,544	A
P8	0,001	B
P9	0,091	B
P10	0,489	A
P11	0,176	A
P12	<0,001	B

Tabelle 6.7 Regressionskoeffizienten für die Gruppen A und B

	b_{nw}	b_{ww}
Gruppe A	16,71	16,03
Gruppe B	16,35	14,05

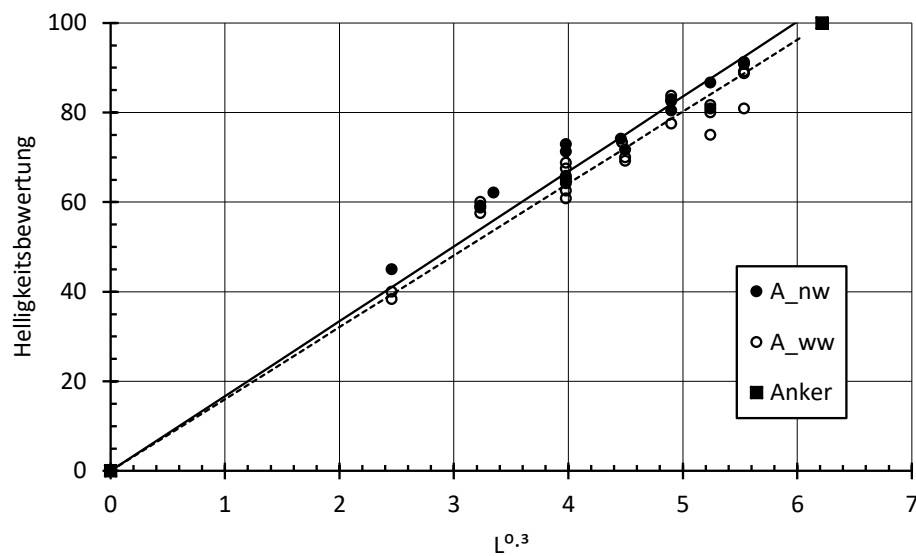


Abbildung 6.11 Daten und Regressionsgeraden der Gruppe A

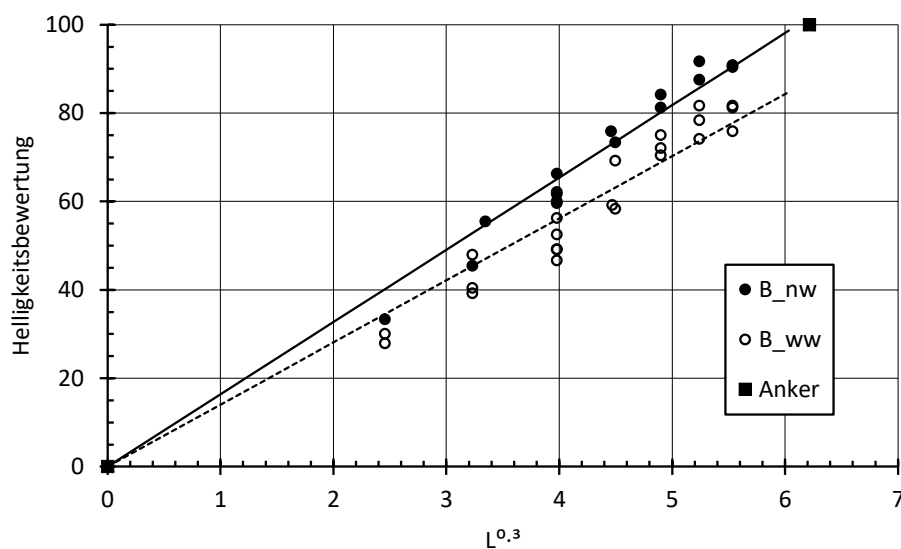


Abbildung 6.12 Daten und Regressionsgeraden der Gruppe B

Die Regressionsgeraden für die neutralweißen und warmweißen Szenen fallen für die Gruppe A nahezu zusammen. Die Regressionskoeffizienten b_{nw} und b_{ww} haben einen nah bei einander liegenden Wert mit einem Unterschied von nur 4 %. Man könnte in diesem Zusammenhang auch von einer achromatischen Helligkeitswahrnehmung der Probanden der Gruppe A sprechen, da der Farbunterschied aufgrund unterschiedlicher, hier untersuchter Farbtemperaturen kaum eine Rolle spielt.

Die Gruppe B dagegen bewertete die Helligkeit unter Einfluss der Farbtemperatur sehr unterschiedlich und weist daher eine chromatische Helligkeitswahrnehmung auf. Die Regressionskoeffizienten liegen hier mit 14 % deutlich auseinander. Zum Vergleich liegt für alle Probanden zusammen der Unterschied bei 9 % und entspricht exakt dem Mittelwert beider Gruppen.

7 Diskussion

In diesem Kapitel werden die einzelnen, aus der durchgeführten Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse erläutert und mit vergangenen Studien verglichen. Den Anfang macht dabei der Zusammenhang zwischen der Helligkeitsbewertung und der Leuchtdichte, gefolgt von der Diskussion des Einflusses der Farbtemperatur und der Farbwiedergabe auf die Wahrnehmung der Helligkeit. Danach wird die Eignung unterschiedlicher vorhandener Helligkeitsmodelle zur Beurteilung großer beleuchteter Flächen geprüft. Zum Abschluss wird auf die interpersonellen Unterschiede eingegangen.

7.1 Helligkeitsskalierung

Die Helligkeitsskalierung, also der Zusammenhang zwischen der Helligkeitsbewertung durch die Probanden und dem physikalischen Reiz, hier als Leuchtdichte repräsentiert, stimmt mit dem von Stevens vorgeschlagenen psychophysischen Gesetz überein. (Stevens, 1957) Auch der ermittelte Exponent $n = 0,3$ stimmt mit den in der Literatur vorkommenden Faktoren überein.

Stevens gibt dabei je nach Versuchsbedingungen Werte zwischen 0,3 und 0,5 an. Wobei er den Wert von 0,33 in seinen Artikeln zu präferieren scheint. (Stevens, 1957; Stevens, et al., 1963; Stevens, 1966; Stevens, 1961)

Marsden fasste viele Studien zusammen, wobei die Werte für den Exponent im Bereich zwischen 0,15 und 0,59 lagen. Darunter waren relativ wenige Studien, die sich mit großen Gesichtsfeldern befasst haben. Zwei Studien mit einem Sichtwinkel von 5° haben einen Exponenten von 0,15 bzw. 0,21 gezeigt. Die Probanden waren dabei allerdings auf das nicht näher benannte Umfeld und den vorherigen Reiz adaptiert. Die Studie von Stevens und Stevens von 1960, die ebenfalls eine 5° -Feldgröße nutzte, aber dunkeladaptierte Probanden testete, ergab einen Exponenten von 0,32. Dies stimmt bezüglich der Adaptationsbedingungen besser mit der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchung überein. (Marsden, 1969) Auch Bodmann und La Toison geben für den Exponenten $n = 0,31$ an. (Bodman, et al., 1994)

In der neueren Untersuchung mit großen, im Winkel nicht begrenzten Feldern kommt Kozaki zu $n = 0,35$, wobei er aus praktischen Gründen mit $n = \frac{1}{3}$ einen vereinfachten Bruch verwendet. (Kozaki, et al., 2013)

Das psychophysische Gesetz von Stevens mit dem Exponent $n \approx 0,3 \dots 0,35$ scheint für die Helligkeitswahrnehmung allgemeingültig zu sein und wird weder durch die Reizgröße (mit Ausnahme sehr kleiner Reize im Winkelminutenbereich) noch durch die Art der Lichtquelle beeinflusst.

So erhält man diesen Exponenten sowohl für kleine Testfelder mit der Größe von 1° - 2° , für mittlere Felder in der Größenordnung von 5 - 10° als auch für große, nicht beschränkte Sichtfelder, wie diese Untersuchung gezeigt hat.

Auf die verwendeten Lichtquellen wird in der Literatur eher selten eingegangen, wobei es sich meistens um Leuchtstofflampen handelt. Wie die vorliegende Arbeit aber zeigt, konnte diesbezüglich kein Einfluss auf die Skalierung der Helligkeitswahrnehmung nachgewiesen werden. Die Exponenten unterscheiden sich nicht für die verschiedenen Lichtquellen, die hier untersucht wurden.

Stark abweichende Exponenten werden in solchen Studien aufgeführt, die entweder eine komplexe Szenerie aufweisen oder aber Szenen recht kurz zeigen und schnell auf die nächste Szene umschalten. Im ersten Fall wäre die Interaktion der verschiedenen Bereiche im Sichtfeld und deren Einfluss auf die Skalierung zu hinterfragen und eingehender zu untersuchen. Im zweiten Fall befindet sich das Auge während der Adaptation in einem Zwischenzustand, so dass die Ergebnisse nicht nur von der Szenendauer und -helligkeit, sondern auch von einer oder mehreren davor präsentierten Szenen abhängen können. Es sind aber keine Studien bekannt, die dies in diesem Zusammenhang untersucht hätten.

7.2 Einfluss der Farbtemperatur

Der Einfluss der spektralen Zusammensetzung der Beleuchtung scheint dagegen sehr komplex zu sein und kann nicht so allgemeingültig wie der Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen Helligkeit und der Leuchtdichte formuliert werden. Die spektrale Empfindlichkeit des Auges hängt sehr stark von den Sehbedingungen ab, da die drei unterschiedlichen Zapfenarten und die Stäbchen eine unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit haben, nicht gleich über der Retina verteilt und komplex miteinander verschaltet sind.

Es muss dabei zwischen zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen unterschieden werden. Zum einen versucht die eher anwendungsorientierte Lichttechnik Korrelationen und Zusammenhänge zwischen den verschiedenen, vom Spektrum abgeleiteten Kennzahlen der Beleuchtung herzustellen. Damit soll dem Anwender eine Orientierungshilfe bei der Lichtplanung gegeben bzw. Mindestanforderungen an eine für die Mehrzahl der Menschen akzeptable Beleuchtung aufgestellt werden. Ein anderer Ansatz ist die physiologische Betrachtung und der Versuch Helligkeitsmodelle auf Grundlage des Augenaufbaus und der dahinter folgenden Signalverarbeitung aufzustellen. Die Grenzen zwischen diesen zwei Domänen sind aber oft fließend und nicht immer eindeutig.

Die Untersuchung in dieser Arbeit zeigt, dass die Probanden die Szenen mit höheren Farbtemperaturen von 4000 K signifikant heller als die warmweißen Szenen mit (je nach Lichtquelle) ca. 2700 K bewerten. Die Regressionsanalyse hat ergeben, dass Szenen mit 4000 K um ca. 9 % höher auf der Helligkeitsskala als warmweiße Szenen trotz gleicher photopischer Leuchtdichte eingeschätzt werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies auch, dass für den gleichen Helligkeitseindruck die Leuchtdichte bei höherer Farbtemperatur um ca. 25 % geringer ist. Somit gilt die Hypothese 1 aus Kapitel 4.8 als erwiesen.

Dies hätte in der Beleuchtungspraxis große Energieeinsparungen beim Einsatz von Lampen mit höherer Farbtemperatur zur Folge, natürlich unter dem Vorbehalt, dass beispielsweise ästhetische oder gesundheitliche Gründe den Einsatz solcher Lampen nicht ausschließen.

Die Studienlage zum Einfluss der Farbtemperatur auf die Helligkeitswahrnehmung ist zum Teil widersprüchlich. So kommt Boyce in verschiedenen eigenen Untersuchungen mit der Beurteilung von gleichen, möblierten Büroräumen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Während seine Studie von 1990 zum Schluss kommt, dass es keinen Helligkeitsunterschied zwischen vier Leuchtstofflampen mit Farbtemperaturen zwischen 2700 K und 6300 K gibt, zeigte seine Untersuchung von 2002, dass die Probanden sehr wohl die Leuchtstofflampen mit 3500 K und 6500 K bezüglich ihres Helligkeitseindrucks im Raum unterscheiden können. Allerdings erlaubt die Befragung mittels semantischen Differentials keine genauere Quantifizierung des Unterschieds. (Boyce, et al., 1990; Boyce, et al., 2002; Boyce, 2003)

Harrington publizierte 1953 eine Untersuchung mit einem Vergleich von nebeneinanderstehenden, beleuchteten Boxen. Die Boxen wurden mit Glühlampen beleuchtet, wobei er durch Einsatz von Filtern Farbtemperaturen zwischen 5400 K und 6300 K erreichte. Die Studie zeigt, dass beim Helligkeitsabgleich die Probanden weniger Licht mit höherer Farbtemperatur benötigen, um die gleiche Helligkeit zu erzielen. Der „Gain“ steigt dabei mit der Differenz in der Farbtemperatur an. Auf die Farbtemperaturdifferenz in dieser Arbeit linear extrapoliert würde sich ein „Gain“ von 13,5 % ergeben. Die exponentielle Extrapolation hätte 22,5 % zum Ergebnis, was dem Resultat dieser Arbeit (ca. 25 %) recht nahe kommt. Leider bietet Harrington nur drei Stützstellen bei höheren Farbtemperaturen als hier verwendet, so dass die Übertragbarkeit nicht gewährleistet ist.

2001 veröffentlichte Ju eine Studie zur Helligkeitswahrnehmung in einem mit Leuchtstofflampen beleuchteten Raum mit drei Farbtemperaturen von 3000 K, 5000 K und 8000 K, sowie drei verschiedenen Beleuchtungsniveaus. Diese Untersuchung zeigt für den Vergleich von 3000 K zu 5000 K ein ähnliches Ergebnis. Für den gleichen Helligkeitseindruck werden 25,5 % weniger Licht mit 5000 K benötigt. Interessanterweise ruft in dieser Studie die Farbtemperatur von 8000 K einen, verglichen mit 5000 K, geringeren Helligkeitseindruck hervor. (Ju, et al., 2012)

Fotios hat eine Reihe von diversen Untersuchungen zur Helligkeitswahrnehmung durchgeführt. Beim Vergleich von Halogenglühlampen mit 2605 K und gefiltert mit 3470 K benötigten gefilterte Lampen mit höherer Farbtemperatur 35 % weniger photopischer Beleuchtungsstärke für den gleichen Helligkeitseindruck. (Fotios, et al., 1995) Beim Vergleich unterschiedlicher Lampentypen wurden die Lampen mit höherer Farbtemperatur grundsätzlich heller wahrgenommen. (Fotios, et al., 1997)

Es kann nun als gesichert gelten, dass ein visueller Reiz mit einer höheren Farbtemperatur heller wahrgenommen wird als ein Reiz mit niedriger Farbtemperatur. Dies konnte in dieser Arbeit noch einmal bestätigt werden. Ergänzend zeigen die Ergebnisse des hier durchgeführten Versuchs, dass dies unabhängig der spektralen Zusammensetzung der Lichtquelle geschieht. So werden Halogenglühlampen, Leuchtstofflampen und auch die Leuchtdioden gleich hell wahrgenommen, wenn sie in etwa die gleiche Farbtemperatur aufweisen.

Offen bleibt dabei der genaue Zusammenhang zwischen der Differenz in der Helligkeitswahrnehmung und der Farbtemperaturdifferenz. Diese Fragestellung wurde bis heute nur sehr unzureichend untersucht.

7.3 Farbwiedergabe

Die Frage, ob Farbwiedergabeeigenschaften der Lichtquellen den Helligkeitseindruck mitbestimmen ist sehr komplex und hängt sehr stark von den Befragungsbedingungen ab. In einer farbigen Umgebung verursacht die Änderung der spektralen Zusammensetzung des Lichts eine Änderung in der Farbe und der Helligkeit der vorhandenen Objekte und der Raumflächen. Damit ändert sich auch ein dem visuellen System präsentierter Reiz sehr stark, wodurch der Vergleich der Studien und eine eindeutige Beantwortung der Frage fast unmöglich ist. Fotios hat eine große Anzahl von Studien aufgearbeitet, wobei auch er in dieser Frage eine Antwort schuldig bleibt. (Fotios, 2001)

In dieser Arbeit haben die Probanden ausschließlich die Helligkeit einer beleuchteten weißen Wand ohne farbige Objekte beurteilt. Sie konnten dadurch nur die Änderung der Farbe des Lichts (ausgedrückt durch die Farbtemperatur) wahrnehmen. Die Analyse der Daten zeigt, dass die Farbwiedergabe einer Lichtquelle in diesem Versuch keinen signifikanten Einfluss auf die Helligkeitsbewertung aufweist.

In einem anderen Versuch am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt wurden im gleichen Testraum und mit der gleichen Beleuchtung einige verschiedenfarbige Objekte auf dem Tisch präsentiert, erst dadurch konnten die Probanden die Lichtquellen und Farbwiedergaben differenzieren. (Pepler, et al., 2012)

7.4 Helligkeitsmodelle

Die Helligkeitsmodelle wurden dahingehend beurteilt, ob sie die Streuung der Datenpunkte um die Regressionsgerade verringern, die durch alle Daten ohne die Aufteilung nach Lichtquellen oder Farbtemperaturen bestimmt wurde. Wenn zwei Szenen gleicher Leuchtdichte unterschiedlich hell bewertet werden, dann liegen die beiden Wertungen in unterschiedlichen Abständen von der Regressionsgerade und erhöhen die Streuung. Dementsprechend erhöht sich auch der Standardschätzfehler, der in dieser Arbeit als das Gütekriterium bei der Beurteilung und dem Vergleich der Modelle dient.

Ein Helligkeitsmodell, das eine wahrnehmungsgerechtere Bewertung der Strahlung durchführt, sollte den beiden verschieden hell wahrgenommenen Szenen entsprechend unterschiedliche äquivalente Leuchtdichten zuweisen und sie auf der Abszisse in die Nähe der Regressionsgeraden verschieben.

Der einfache Austausch der $V(\lambda)$ -Funktion durch die von Judd modifizierte $V_M(\lambda)$ bringt keine Verringerung des Schätzfehlers mit sich. Beide Funktionen gelten für das 2°-Sichtfeld und sind sehr ähnlich. Dass die leichten Korrekturen im blauen Bereich des Spektrums, die die $V_M(\lambda)$ mit

sich bringt, für die Bewertung weißer, breitbandiger Lichtquellen nur einen sehr geringen Unterschied machen, ist dabei schon länger bekannt. (Boyce, 2003)

Die Strahlungsbewertung mittels $y_{10}(\lambda)$ -Funktion führt dagegen zu einer leichten Verringerung des Schätzfehlers. Diese Funktion gewichtet den blauen Spektralbereich stärker als die $V(\lambda)$ oder $V_M(\lambda)$ und stammt aus dem CIE Kolorimetriesystem für 10° -große Sichtfelder, was den Testbedingungen dieser Arbeit besser entspricht. Der CIE 141-Report fasst insgesamt vier Helligkeitsmodelle für die 2° -großen Sichtfelder und weitere sechs Modelle die auf 10° -Sichtfeldern basieren zusammen.

Die Auswertung unter Verwendung der äquivalenten Leuchtdichte für die vier 2° -Helligkeitsmodelle haben zu einem nahezu gleichen Standardschätzfehler geführt, wie die Bewertung mittels der $V(\lambda)$ - oder $V_M(\lambda)$ -Funktion ergeben hat. Das Modell von Nakano dagegen vergrößert die Streuung der Punkte erheblich und hat daher einen größeren Fehler zur Folge.

Wenn die berechneten äquivalenten Leuchtdichten der einzelnen Szenen gegenüber ihren entsprechenden photopischen Leuchtdichten aufgetragen werden (wie in Abbildung 7.1), scheint es, dass die Modelle von Ware-Cowan, Guth, sowie Yaguchi-Ikeda für die verwendeten weißen Lichtquellen auch durch eine Linearkombination der Leuchtdichte mit einem konstanten Faktor dargestellt werden können. Es ist möglich durch die Punkte eine Gerade mit nur minimalen Abweichungen zu ziehen.

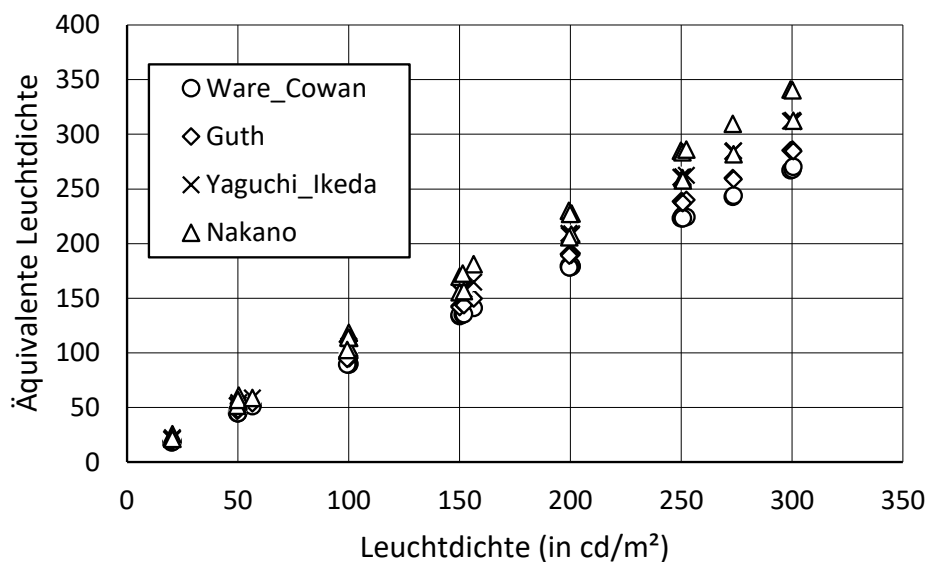


Abbildung 7.1 Vergleich der photopischen Leuchtdichte der Szenen mit den äquivalenten Leuchtdichten auf Basis der 2° -Helligkeitsmodelle

Dies ist zwar für das Ware-Cowan-Modell auch aus den Berechnungsvorschriften augenfällig, für die Modelle von Guth und Yaguchi-Ikeda aber nicht direkt ersichtlich. Das Modell von Nakano, das auf den physiologischen Untersuchungen der Signalverarbeitung im Auge basiert,

bewertet verschiedene Spektren gleicher Leuchtdichte unterschiedlich, scheint aber trotzdem auf die Ergebnisse unter den Bedingungen in der vorliegenden Arbeit nicht anwendbar zu sein.

Die 10° -Helligkeitsmodelle folgen, mit Ausnahme der Modelle von Sagawa-Takeichi und Nakano-Ikeda, den Ergebnissen, die mit der $y_{10}(\lambda)$ -Funktion erzielt wurden. Diese beiden Modelle beschreiben die vorliegenden Daten ebenfalls deutlich schlechter als die Bewertung mit der $y_{10}(\lambda)$ -Funktion.

Das 2011 mit dem CIE 200-Report verabschiedete Supplementär-System der Photometrie basiert auf dem Modell von Nakano mit leichten Korrekturen nach Sagawa. (Sagawa, 2006) Daher verwundert es nicht, dass der Standardschätzfehler ähnlich hoch ist.

Aus diesen Erkenntnissen folgt, dass die von der CIE betrachteten Helligkeitsmodelle, die auf heterochromatischen Helligkeitsabgleichen für relativ kleine Sichtfelder von 2° bzw. 10° basieren, nicht geeignet sind, um die Helligkeitswahrnehmung von Lichtquellen unter den hier beschriebenen Bedingungen zu beschreiben. Sie liefern keine wesentlich besseren Vorhersagen der Helligkeitswahrnehmung als dies durch die $V(\lambda)$ -Funktion geschieht.

Die Modelle von Berman und Fotios, die unter ähnlichen Bedingungen zu dieser Untersuchung erstellt wurden, verringern die Streuung der Daten dagegen sehr stark und haben daher einen kleineren Standardschätzfehler zur Folge. Diese Modelle basieren auf der Korrektur der photopischen Leuchtdichte mit dem S/p - bzw. dem SWS/p -Verhältnis, was stark durch physiologische Erkenntnisse gestützt wird. (Fotios, et al., 1998; Mollon, et al., 1990) Dies führt dazu, dass der Zusammenhang zwischen der Helligkeitsbewertung und den *SWS Lumens* nicht mehr von der Farbtemperatur abhängig ist.

Es wäre interessant zu untersuchen, ob sich diese beiden Modelle auch in einer komplexeren Umgebung als in der vorliegenden Arbeit bewähren würden und möglicherweise sich als geeigneteres Maß zur Beurteilung der Helligkeit in der Allgemeinbeleuchtung als die $V(\lambda)$ -basierten lichttechnischen Größen erweisen würden.

7.5 Interpersonelle Unterschiede

Die Analyse der Antworten der einzelnen Probanden zeigt, dass der beschriebene Zusammenhang zwischen der Farbtemperatur der Lichtquelle und der Helligkeitswahrnehmung zwar für eine größere Gruppe von Probanden, aber nicht unbedingt für einzelne Personen gültig ist. Die Hypothese 3 aus Kapitel 4.8 ist somit erwiesen.

So zeigte die Varianzanalyse, dass die Hälfte der Personen in ihrer Helligkeitsbewertung nicht durch die Farbtemperatur beeinflusst wird. Für diese scheint die Strahlungsbewertung unterschiedlicher Lichtquellen mittels der $V(\lambda)$ -Funktion gemeinsam mit dem Gesetz von Stevens zu richtigen Vorhersagen der Helligkeitswahrnehmung zu führen.

Die andere Gruppe dagegen trennt die Szenen mit den verschiedenen Farbtemperaturen sehr stark, so dass Modelle zur Helligkeit auf jeden Fall auch die chromatischen Kanäle in der Reizverarbeitung berücksichtigen müssen.

Wahrscheinlich kann man die Menschen noch feiner bezüglich ihrer Helligkeitswahrnehmung in verschiedene Gruppen unterteilen, als dies hier vorgeschlagen wurde. Dazu wäre aber eine viel größere Anzahl von Probanden notwendig. Trotzdem kann auch hier bereits erkannt werden, wie wichtig das Wissen um den chromatischen Typ eines Probanden sein kann. Denn je nachdem wie das Verhältnis von chromatischen zu achromatischen Probanden in einer Studie ist, können auch bei einem ähnlichen Versuchsaufbau und -ablauf unterschiedliche und zum Teil gegensätzliche Schlüsse gezogen werden. Dies stellt vor allem solche Studien vor ein Problem, die eine geringe Probandenanzahl aufweisen. Dies ist in der Lichttechnik aber eher der Regelfall als die Ausnahme.

7.6 Empfehlungen für zukünftige Forschungsarbeiten

Grundsätzlich gilt es bei zukünftigen Forschungen zwischen unterschiedlichen Motivationen abzuwägen. Die Untersuchung von praktisch relevanten Beleuchtungsszenarien steht Studien zum grundlegenden Verständnis des visuellen Systems manchmal entgegen, weshalb hier die Empfehlungen dahingehend unterschieden werden.

Generell ist zu empfehlen, Probandenzahlen zu erhöhen, um bestimmte Effekte statistisch besser untermauern zu können, und den Aspekt der Gruppierung in Probandenkollektive näher zu untersuchen und die unterschiedlichen Wahrnehmungstypen detaillierter auszuarbeiten, wie das in dieser Arbeit im Ansatz geschehen ist. Da durch die demographische Entwicklung auch viel zum Thema „Sehen im Alter“ geforscht wird, sollten aktuellste Erkenntnisse aus dem Bereich genutzt werden um Alterseffekte zu korrigieren. Dies würde ebenfalls zu einer höheren statistischen Sicherheit führen.

7.6.1 Praxisrelevante Studien

Aufgrund der sehr individuellen Wahrnehmung sind bei komplexen Szenen umso mehr Probanden notwendig um signifikante Effekte auszumachen. Wie schon gezeigt, hat der Einfluss der Untersuchungsmethodik viele Facetten (siehe Kapitel 4.7). Wenn diese Einflüsse Fotios folgend isoliert untersucht und quantifiziert werden können, ist man in der Lage eine größere Anzahl von Studien zu vergleichen und in Modellierungsprozesse mit einzubeziehen. Dadurch kann die Datenbasis enorm erhöht und die Signifikanz von Effekten genauer überprüft werden.

Um eine Brücke zu realen Szenen zu schlagen, könnte systematisch die Komplexität in untersuchten Beleuchtungsszenen erhöht werden. Von unbunten zu farbigen Objekten unterschiedlicher Sättigung, bis hin zur Variation von Ort, Größe und Form im Gesichtsfeld, können einzelne Einflussparameter auf die wahrgenommene Helligkeit ausgemacht werden. Hierdurch wäre eine Erkenntnis möglich, in welchem Schritt des Wahrnehmungsprozesses welche Effekte entstehen.

7.6.2 Physiologische Studien

Im Fokus von physiologischen Studien sollte der systematische Aufbau von physiologisch motivierten Modellen der Helligkeitswahrnehmung stehen. In praxisnahen Modellräumen sollte die Anzahl der untersuchten spektralen Strahlungsverteilungen erweitert werden, um größere Farbtemperaturbereiche, als auch Farbwiedergabeniveaus abzudecken. Der Einsatz künstlicher Lichtquellen (multispektrale Quellen), welche üblicherweise nicht im Innenraum Anwendung finden, ist hier zu empfehlen, um eine Parametertrennung von Farbtemperatur und Farbwiedergabe zu verbessern. Dadurch könnten auch spektrale „Grenzbereiche“ realisiert werden, die zwar von der Anwendung entfernt sind, jedoch z.B. im Empfindlichkeitsmaximum eines Opponentkanals liegen.

Vielleicht wäre hier auch eine Studie mit Probanden mit Farbsehschwächen sinnvoll, um einen entdeckten Einflussparameter physiologisch zu stützen.

7.7 Empfehlungen für die Lichtplanung

Es ist schwierig aus den Ergebnissen dieser Arbeit konkrete Konsequenzen für die Lichtplanung abzuleiten. Eine Anwendbarkeit dieser für eine spezifische Planungssituation ist zwar komplex, aber stellenweise sinnvoll. Hierbei ist wichtig zu beachten, welches Ziel die Beleuchtung verfolgt, falls z.B. ein Einfluss auf die Arbeitsleistung erzielt werden soll (Diskussion in „Lighting Research and Technology“ 2004 Ausgabe 36) ist die Datenlage schlichtweg nicht ausreichend.

Problematisch ist hier aber, dass normativ die Voraussetzungen dafür geschaffen werden müssen. Aktuell wird in einschlägigen Normen wie der DIN12464 ausschließlich auf Beleuchtungsstärken geplant. Eine Kompensation der geringeren wahrgenommenen Helligkeit warmer Lichtfarben würde etwa zu einer Erhöhung der Beleuchtungsstärke führen. Offensichtlich wären hierdurch die Anforderungen durch eine Norm übererfüllt, was unter dem anhaltenden Druck der Effizienzdiskussion als negativ ausgelegt werden könnte. Dies stellt jedoch nur eine Unzulänglichkeit der Norm dar, die korrigiert werden müsste. Durch die Einführung von Beleuchtungsstärkebändern statt harten Grenzwerten könnten mehr Freiheiten in der Lichtplanung erlangt werden, um die Erkenntnisse der Forschung in die Anwendung zu bringen.

Die in den letzten Jahren erzielten Effizienzsteigerungen durch die LED-Technologie sind enorm, sodass der Fokus in der Lichtplanung nun weniger auf der Energieeinsparung als auf der Steigerung der Lichtqualität liegen sollte.

Ein weiterer sehr aktiver Zweig, der davon profitieren würde, sind die nichtvisuellen Wirkungen der Beleuchtung, in welchem viel geforscht wird. Hier werden fast ausschließlich Beleuchtungsanlagen mit variablen Farbtemperaturen verwendet. Bei Variation dieser, sollte man sich immer des Einflusses auf die Helligkeitswahrnehmung bewusst sein, um korrekte Schlüsse zu ziehen.

8 Literaturverzeichnis

Bartenbach, C. und Wittig, W. 2009. *Handbuch für Lichtgestaltung*. Wien : Springer Verlag, 2009.

Bartleson, C.J. und Breneman, E.J. 1967. Brightness perception in complex fields. *JOSA*. 1967, Bd. 57, 7.

Berman, S.M. 1995. *The Reengineering of Lighting Photometry*. Berkeley : Lawrence Berkeley National Laboratory, 1995.

Berman, S.M., et al. 1990. Photopic luminance does not always predict perceived room brightness. *Light. Res. Technol.* 1990, Bd. 22, 1.

BGI 856. 2008. *Beleuchtung im Büro*. Hamburg : Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG), 2008.

Bodman, H.W. 1992. Elements of photometry, brightness and visibility. *Light. Res. Technol.* 1992, Bd. 24, 1.

Bodman, H.W. und La Toison, M. 1994. Predicted brightness-luminance phenomena. *Light. Res. Technol.* 1994, Bd. 26, 3.

Boyce, P. R. 2004. Lighting research for interiors: the beginning of the end or the end of the beginning. *Lighting Res. Technol.* 36, 2004, Bd. 4.

—. **2003.** *Human Factors in Lighting*. 2. Auflage. London : Taylor & Francis, 2003.

—. **1977.** Investigations of the subjective balance between illuminance and lamp colour properties. *Light. Res. Technol.* 1977, Bd. 9, 1.

Boyce, P.R. und Cuttle, C. 1990. Effect of correlated colour temperature on the perception of interiors and colour discrimination performance. *Light. Res. Technol.* 1990, Bd. 22, 1.

Boyce, P.R., et al. 2003. The impact of spectral power distribution on the performance of an achromatic visual task. *Light. Res. Technol.* 2003, Bd. 35, 2.

Boyce, P.R., Hunter, C.M. und Carter, C.B. 2002. Perception of full-spectrum, polarized lighting. *J. Illum. Eng. Soc.* 2002, Bd. 31.

Burns, S.A., et al. 1982. Brightness of equal-luminance lights. *J. Opt. Soc. A*. 1982, Bd. 72, 9.

CIE 141. 2001. *Testing of supplementary systems of photometry*. Wien : CIE Central Bureau, 2001.

- CIE. 2014.** 17-1224 spectral mismatch correction factor (for a photometer) [F*]. [Online] 2014. [Zitat vom: 1. September 2014.] <http://eiv.cie.co.at/term/1224>.
- CIE 200. 2011.** *Supplementary System of Photometry*. Wien : CIE Central Bureau, 2011.
- CIE 75. 1988.** *Spectral Luminous efficiency fundtions based upon brightness matching*. Wien : CIE Central Bureau, 1988.
- CIE 78. 1988.** *Brightness Luminance Relations - Classified bibliography*. Wien : CIE central bureau, 1988.
- CIE TC1-80. 2012.** *Guidance for best practise in psychophysical procedures used when measuring relative spatial brightness*. Wien : CIE Central Bureau, 2012.
- Comerford, J.P. und Kaiser, P.K. 1975.** Luminous-efficiency functions determined by heterochromatic brightness matching. *J. Opt. Soc. A.* 1975, Bd. 65, 4.
- DIN 67519. 1970.** *Aktivität im optischen Bereich; Begriff, Messung, Anwendung*. Berlin : Beuth Verlag, 1970.
- DIN EN 12464-1. 2011.** *Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*. Berlin : Beuth Verlag, 2011.
- Dittami, S. 2009.** Shapiro-Wilk Normality Test. [Online] 2009. [Zitat vom: 29. August 2014.] <http://sdittami.altervista.org/shapiretest/ShapiroTest.html>.
- Fotios, S. A. und Cheal, C. 2010.** A comparison of simultaneous and sequential brightness judgements. *Lighting Res. Technol.* 2010, Bd. 42.
- Fotios, S. und Levermore, G.J. 1997.** Perception of electric light sources of different colour properties. *Light. Res, Technol.* 1997, Bd. 29, 3.
- Fotios, S.A. 2002.** Experimental conditions to examine the relationship between lamp colour properties and apparent brightness. *Light. Res. Technol.* 2002, Bd. 34, 1.
- . **2001.** Lamp colour properties and apparent brightness: a review. *Light. Res. Technol.* 2001, Bd. 33, 3.
- Fotios, S.A. und Levermore, G.J. 1998.** Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces II: sws Lumens model. *Light. Res. Technol.* 1998, Bd. 30, 3.
- . **1998.** Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces III: Chromatic brightness model. *Lighting Res. Technol.* 1998.
- . **1995.** Visual perception under tungsten lamps with enhanced blue spectrum. *Light. Res. Technol.* 1995, Bd. 27, 4.

- Fotios, S.A., Levermore, G.J. 1998.** Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces I: Untroduction and colour gamut models. *Light. Res. Technol.* 1998.
- Ganslandt, R. und Hofmann, H. 1992.** *Handbuch der Lichtplanung*. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg Verlag, 1992.
- Guilford, J.P. 1954.** *Psychometric Methods*. New York, Toronto, London : McGraw-Hill, 1954.
- Hardis, J.E. 2001.** *Visibility of Radiant Energy*. Gaithersburg : NIST, 2001.
- Harrington, R.E. 1954.** Effect of Color Temperature on Apparent Brightness. *J. Opt. Soc. Am.* 1954, Bd. 44, 2.
- Haubner, P. 1977.** *Zur Helligkeitsbewertung quasi-achromatischer Reize*. Karlsruhe : Technische Hochschule, 1977.
- Hentschel, H.-J. 1994.** *Licht und Beleuchtung*. Heidelberg : Hüthig Verlag, 1994.
- Houser, K.W. 1999.** Toward a non-additive spectral weighting function for brightness perception. *CIE Symposium '99*. 1999.
- Ikeda, M. und Shimozone, H. 1978.** Luminous efficiency functions determined by successive brightness matching. *J. Opt. Soc. Am.* 1978, Bd. 68, 12.
- Ikeda, M., Ikeda, J. und Ayama, M. 1992.** Specification of individual variation in luminous efficiency for brightness. *Color res. appl.* 1992, Bd. 17, 1.
- Ikeda, M., Yaguchi, H. und Sagawa, K. 1982.** Brightness luminous-efficiency functions for 2° and 10° fields. *J. Opt. Soc. Am.* 1982, Bd. 72, 12.
- Ju, J., Chen, D. und Lin, Y. 2012.** Effects of Correlated Color Temperature on Spatial Brightness Perception. *Color Research and Application*. 2012, Bd. 37, 6.
- Khanh, T. Q. und Pepler, W. 2012.** Lampenspektren & Wahrnehmung. *LICHT*. 2012, 7-8.
- Kozaki, M., et al. 2013.** A proposal of predictive equation for "spatial brightness" considering the effect of looking around and its application to real project. *Proceedings of CIE Centenary Conference*. Paris : CIE, 2013.
- Marsden, A.M. 1969.** Brightness - a review of current knowledge. *Light. Res. Technol.* 1969, Bd. 1, 3.
- Mollon, J.D., Estevez, O. und Cavanus, C.R. 1990.** The two subsystems of colour vision and their roles in wavelength discrimination. [Buchverf.] C. Blakemore. *Vision: Coding and Efficiency*. Cambridge : s.n., 1990.
- Pepler, W., Böll, M. und Khanh, T.Q. 2012.** Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungskonzepte und Lampenspektren in der Innenraumbeleuchtung. *Licht 20/12*. 2012.

- Rinner, O. und Gegenfurtner, K.R. 2000.** Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination. *Vis. Res.* 2000, Bd. 40.
- Sagawa, K. 2006.** Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any level including mesopic vision. *Ophthalmic and Physiological Optics.* 2006.
- Sagawa, K. und Takahashi, Y. 2001.** Spectral luminous efficiency as a function of age. *J. Opt. Soc. Am.* 2001, Bd. 18, 11.
- Sagawa, K. und Takeichi, K. 1992.** System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships. *J. Opt. Soc. Am.* 1992, Bd. 9, 8.
- Sedlmeier, P. und Renkewitz, F. 2008.** *Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie.* München : Pearson Studium, 2008.
- Seier, E. 2002.** *Comparison of Tests for Univariate Normality.* Johnson City : East Tennessee State University, 2002.
- Shapiro, S.S. und Wilk, M.B. 1965.** An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika.* 1965, Bd. 52, 3/4.
- Shevell, S.K. 2001.** The Time Course of Chromatic Adaptation. *Color research and application.* 2001, Bd. Supplement Volume 26.
- Spada, H. 1992.** *Lehrbuch Allgemeine Psychologie.* Bern : Verlag Hans Huber, 1992.
- Stevens, J.C. und Stevens, S.S. 1963.** Brightness Function: Effects of Adaptation. *J. Opt. Soc. Am.* 1963, Bd. 53, 3.
- Stevens, S.S. 1957.** On the psychophysical law. *Psychol. Rev.* 1957, Bd. 64, 3.
- Stevens, S.S. 1966.** Concerning the Measurement of Brightness. *J. Opt. Soc. Am.* 1966, Bd. 56.
- . **1961.** To Honor Fechner and Repeal His Law. *American Association for the Advancement of Science.* 1961, Bd. 133, 3446.
- Thornton, W. A. 1973.** A system of photometry and colorimetry based directly on visual response. *J. Illum. Eng. Soc.* 3, 1973.
- Trezona, P.W. 1973.** The tetrachromatic colour match as a colorimetric technique. *Vision Res.* 1973, Bd. 13, 1.
- Uchikawa, K. und Ikeda, M., 1986.** Accuracy of memory for brightness of colored lights measured with successive comparison method. *J. Opt. Soc. Am.* 1986, Bd. 3, 1.
- Vrabel, P.L., Bernecker, C.A. und Mistrick, R.G. 1998.** Visual performance and visual clarity under electric light sources: Part II – Visual clarity. *Illuminating Enginng Soc.* 27, 1998.

Yaguchi, H., et al. 1993. Individual differences of the contribution of chromatic channels to brightness. *J. Opt. Soc. Am. A.* 1993, Bd. 10, 6.

—, **1993.** Individual differences of the contribution of chromatic channels to brightness. *J. Soc. Opt. Am.* 1993, Bd. 10, 6.

9 Anhang

9.1 Beleuchtungskennwerte

Quelle	L_{soll}	x	y	x_{10}	y_{10}	T_{CT}
HAL	20	0,5190	0,4147	0,5225	0,4139	2074
	50	0,5028	0,4163	0,5066	0,4153	2236
	100	0,4887	0,4164	0,4928	0,4153	2384
	150	0,4762	0,4155	0,4803	0,4145	2523
	200	0,4740	0,4152	0,4781	0,4142	2548
	250	0,4656	0,4141	0,4697	0,4130	2649
	300	0,4645	0,4138	0,4686	0,4128	2661
LED27	20	0,4587	0,4114	0,4651	0,4069	2723
	50	0,4592	0,4115	0,4656	0,4070	2717
	100	0,4599	0,4111	0,4662	0,4062	2704
	150	0,4586	0,4116	0,4651	0,4068	2725
	200	0,4600	0,4111	0,4664	0,4061	2701
	250	0,4590	0,4113	0,4654	0,4064	2718
	300	0,4602	0,4110	0,4665	0,4060	2698
LED40	20	0,3837	0,3832	0,3892	0,3794	3962
	50	0,3839	0,3833	0,3894	0,3794	3956
	100	0,3842	0,3831	0,3898	0,3790	3945
	150	0,3833	0,3834	0,3888	0,3793	3973
	200	0,3843	0,3828	0,3897	0,3787	3943
	250	0,3833	0,3832	0,3889	0,3791	3970
	300	0,3844	0,3829	0,3899	0,3788	3939
LL27	50	0,4608	0,4096	0,4666	0,4035	2679
	100	0,4643	0,4141	0,4704	0,4080	2667
	150	0,4694	0,4222	0,4763	0,4160	2659
	200	0,4678	0,4224	0,4748	0,4158	2681
	250	0,4668	0,4243	0,4740	0,4173	2710
	300	0,4661	0,4241	0,4733	0,4171	2718
LL40	50	0,3779	0,3786	0,3833	0,3731	4084
	100	0,3807	0,3832	0,3864	0,3777	4041
	150	0,3846	0,3914	0,3909	0,3854	3997
	200	0,3833	0,3891	0,3894	0,3831	4014
	250	0,3836	0,3917	0,3900	0,3853	4024
	300	0,3835	0,3911	0,3899	0,3846	4022

	L_{soll}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_a
HAL	20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	150	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	200	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	250	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	300	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
LED27	20	90	92	91	89	88	88	94	83	61	79	87	67	90	94	89
	50	90	92	91	89	88	88	94	83	61	79	87	67	90	94	89
	100	89	92	91	89	87	87	93	83	59	78	86	67	90	94	89
	150	90	92	91	89	87	87	94	83	60	78	86	66	90	94	89
	200	89	92	91	89	87	87	93	82	59	78	86	67	90	94	89
	250	89	92	91	89	87	87	93	83	59	78	86	66	90	94	89
	300	89	92	91	89	87	87	93	82	59	78	86	67	89	94	89
LED40	20	89	90	89	90	87	84	94	86	61	75	88	61	89	93	89
	50	89	90	89	90	87	84	94	86	61	75	88	62	89	93	89
	100	89	90	89	90	87	84	93	86	61	74	88	62	89	93	89
	150	89	90	89	90	87	84	93	86	61	74	88	61	88	93	88
	200	89	90	89	90	87	84	93	86	61	74	88	62	89	93	89
	250	89	89	88	89	87	84	93	86	60	74	88	61	88	93	88
	300	89	90	89	90	87	84	93	86	61	74	88	63	89	93	88
LL27	50	99	97	58	90	90	89	87	61	-10	60	82	56	94	70	84
	100	99	97	59	91	90	89	87	61	-11	60	82	56	94	71	84
	150	99	97	58	92	89	88	88	60	-13	58	81	54	95	71	84
	200	98	97	58	92	88	86	88	60	-13	56	80	52	96	70	83
	250	97	95	57	91	87	84	88	61	-14	54	79	49	97	70	83
	300	97	95	57	91	86	84	88	61	-13	53	78	49	97	70	82
LL40	50	95	92	53	87	85	76	88	76	18	46	70	53	96	69	82

L_{soll}	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_d
100	95	91	53	87	84	76	89	76	16	45	69	52	96	69	81
150	93	90	54	87	82	75	89	74	11	44	68	49	94	69	81
200	93	90	54	87	83	75	89	75	12	44	68	50	95	69	81
250	92	89	53	86	81	73	89	74	9	41	66	47	93	69	80
300	92	89	53	86	81	73	89	74	9	41	66	47	93	69	79

9.2 Helligkeitsbewertungen der ersten Befragung

	P1	P2	P3	P4
HAL	20	20	25	30
	40	25	25	50
	25	45	20	40
	40	25	15	—
	50	40	30	—
	60	45	30	60
	70	50	35	80
	80	55	40	70
	90	60	45	90
	100	65	50	70
	150	70	55	90
	200	75	60	90
	250	80	65	90
	300	85	70	100
LED27	20	25	30	30
	40	30	30	50
	50	35	35	30
	60	40	35	70
	70	45	40	50
	80	50	45	70
	90	55	50	75
	100	60	55	100
	150	65	60	80
	200	70	65	90
	250	75	70	90
	300	80	75	100
LED40	20	30	35	30
	40	35	40	30
	50	40	45	60
	60	45	50	60
	70	50	55	80
	80	55	60	80
	90	60	65	90
	100	65	70	100
	150	70	75	100
	200	75	80	100
	250	80	85	100
	300	85	90	100
LL27	50	60	70	50
	70	65	75	75
	90	70	80	70
	110	75	85	70
	130	80	90	85
	150	85	95	100
	170	90	100	100
	190	95	105	100
	210	100	110	100
	230	105	115	100
	250	110	120	100
	270	115	125	100
	290	120	130	100
	310	125	135	100
	330	130	140	100
	350	135	145	100
	370	140	150	100
	390	145	155	100
	410	150	160	100
	430	155	165	100
	450	160	170	100
	470	165	175	100
	490	170	180	100
	510	175	185	100
	530	180	190	100
	550	185	195	100
	570	190	200	100
	590	195	205	100
	610	200	210	100
	630	205	215	100
	650	210	220	100
	670	215	225	100
	690	220	230	100
	710	225	235	100
	730	230	240	100
	750	235	245	100
	770	240	250	100
	790	245	255	100
	810	250	260	100
	830	255	265	100
	850	260	270	100
	870	265	275	100
	890	270	280	100
	910	275	285	100
	930	280	290	100
	950	285	295	100
	970	290	300	100
	990	295	305	100
	1010	300	310	100
	1030	305	315	100
	1050	310	320	100
	1070	315	325	100
	1090	320	330	100
	1110	325	335	100
	1130	330	340	100
	1150	335	345	100
	1170	340	350	100
	1190	345	355	100
	1210	350	360	100
	1230	355	365	100
	1250	360	370	100
	1270	365	375	100
	1290	370	380	100
	1310	375	385	100
	1330	380	390	100
	1350	385	395	100
	1370	390	400	100
	1390	395	405	100
	1410	400	410	100
	1430	405	415	100
	1450	410	420	100
	1470	415	425	100
	1490	420	430	100
	1510	425	435	100
	1530	430	440	100
	1550	435	445	100
	1570	440	450	100
	1590	445	455	100
	1610	450	460	100
	1630	455	465	100
	1650	460	470	100
	1670	465	475	100
	1690	470	480	100
	1710	475	485	100
	1730	480	490	100
	1750	485	495	100
	1770	490	500	100
	1790	495	505	100
	1810	500	510	100
	1830	505	515	100
	1850	510	520	100
	1870	515	525	100
	1890	520	530	100
	1910	525	535	100
	1930	530	540	100
	1950	535	545	100
	1970	540	550	100
	1990	545	555	100
	2010	550	560	100
	2030	555	565	100
	2050	560	570	100
	2070	565	575	100
	2090	570	580	100
	2110	575	585	100
	2130	580	590	100
	2150	585	595	100
	2170	590	600	100
	2190	595	605	100
	2210	600	610	100
	2230	605	615	100
	2250	610	620	100
	2270	615	625	100
	2290	620	630	100
	2310	625	635	100
	2330	630	640	100
	2350	635	645	100
	2370	640	650	100
	2390	645	655	100
	2410	650	660	100
	2430	655	665	100
	2450	660	670	100
	2470	665	675	100
	2490	670	680	100
	2510	675	685	100
	2530	680	690	100
	2550	685	695	100
	2570	690	700	100
	2590	695	705	100
	2610	700	710	100
	2630	705	715	100
	2650	710	720	100
	2670	715	725	100
	2690	720	730	100
	2710	725	735	100
	2730	730	740	100
	2750	735	745	100
	2770	740	750	100
	2790	745	755	100
	2810	750	760	100
	2830	755	765	100
	2850	760	770	100
	2870	765	775	100
	2890	770	780	100
	2910	775	785	100
	2930	780	790	100
	2950	785	795	100
	2970	790	800	100
	2990	795	805	100
	3010	800	810	100
	3030	805	815	100
	3050	810	820	100
	3070	815	825	100
	3090	820	830	100
	3110	825	835	100
	3130	830	840	100
	3150	835	845	100
	3170	840	850	100
	3190	845	855	100
	3210	850	860	100
	3230	855	865	100
	3250	860	870	100
	3270	865	875	100
	3290	870	880	100
	3310	875	885	100
	3330	880	890	100
	3350	885	895	100
	3370	890	900	100
	3390	895	905	100
	3410	900	910	100
	3430	905	915	100
	3450	910	920	100
	3470	915	925	100
	3490	920	930	100
	3510	925	935	100
	3530	930	940	100
	3550	935	945	100
	3570	940	950	100
	3590	945	955	100
	3610	950	960	100
	3630	955	965	100
	3650	960	970	100
	3670	965	975	100
	3690	970	980	100
	3710	975	985	100
	3730	980	990	100
	3750	985	995	100
	3770	990	1000	100
	3790	995	1005	100
	3810	1000	1010	100
	3830	1005	1015	100
	3850	1010	1020	100
	3870	1015	1025	100
	3890	1020	1030	100
	3910	1025	1035	100
	3930	1030	1040	100
	3950	1035	1045	100
	3970	1040	1050	100
	3990	1045	1055	100
	4010	1050	1060	100
	4030	1055	1065	100
	4050	1060	1070	100
	4070	1065	1075	100
	4090	1070	1080	100
	4110	1075	1085	100
	4130	1080	1090	100
	4150	1085	1095	100
	4170	1090	1100	100
	4190	1095	1105	100
	4210	1100	1110	100
	4230	1105	1115	100
	4250	1110	1120	100
	4270	1115	1125	100
	4290	1120	1130	100
	4310	1125	1135	100
	4330	1130	1140	100
	4350	1135	1145	100
	4370	1140	1150	100
	4390	1145	1155	100
	4410	1150	1160	100
	4430	1155	1165	100
	4450	1160	1170	100
	4470	1165	1175	100
	4490	1170	1180	100
	4510	1175	1185	100
	4530	1180	1190	100
	4550	1185	1195	100
	4570	1190	1200	100
	4590	1195	1205	100
	4610	1200	1210	100
	4630	1205	1215	100
	4650	1210	1220	100
	4670	1215	1225	100
	4690	1220	1230	100
	4710	1225	1235	100
	4730	1230	1240	100
	4750	1235	1245	100
	4770	1240	1250	100
	4790	1245	1255	100
	4810	1250	1260	100
	4830	1255	1265	100
	4850	1260	1270	100
	4870	1265	1275	100
	4890	1270	1280	100
	4910	1275	1285	100
	4930	1280	1290	100
	4950	1285	1295	100
	4970	1290	1300	100
	4990	1295	1305	100
	5010	1300	1310	100
</				

	P5				P6				P7				P8				
HAL	20	40	40	40	40	30	30	20	40	50	50	50	60	40	30	40	30
	50	55	60	60	80	40	40	40	40	60	70	50	65	40	30	50	40
	100	80	70	65	60	70	70	50	60	65	80	60	75	70	60	70	70
	200	90	90	90	80	90	70	90	70	90	80	80	85	70	80	90	80
	300	80	95	100	100	80	90	90	80	85	80	80	85	80	80	90	90
LED27	20	45	40	40	35	30	30	30	30	50	50	40	60	10	20	20	10
	50	65	65	60	50	50	50	50	40	65	60	50	60	30	20	30	20
	100	65	60	70	85	40	50	50	50	75	60	60	65	30	30	50	30
	200	90	70	100	95	90	80	90	70	80	80	70	80	70	50	70	50
	300	100	95	100	100	100	80	90	80	85	80	90	80	80	80	70	80
LED40	20	50	60	60	45	20	50	20	50	55	50	40	60	20	20	20	20
	50	55	60	60	50	40	50	50	50	65	65	60	70	40	30	40	40
	100	80	85	80	60	50	60	90	60	70	70	70	75	50	50	50	40
	200	85	100	90	90	100	90	100	90	80	80	80	95	90	70	80	90
	300	100	60	100	100	100	100	40	50	90	80	20	90	90	90	90	90
LL27	50	50	70	75	80	60	50	50	60	60	70	65	60	30	20	40	50
	100	75	80	70	50	70	70	70	65	70	60	65	70	50	40	60	60
	200	70	85	80	85	90	70	80	80	80	70	70	75	90	70	70	60
	300	80	50	100	90	100	80	50	60	85	80	80	80	80	80	70	80
LL40	50	65	75	70	55	80	60	70	80	60	65	50	75	60	50	40	50
	100	70	85	85	75	70	80	60	85	70	65	70	70	40	50	70	40
	200	90	85	90	95	100	90	90	80	90	80	75	90	70	70	90	80
	300	100	100	95	95	100	100	100	80	90	75	80	85	90	100	90	90

	P9				P10				P11				P12			
HAL	20	40	40	30	40	40	50	30	30	45	50	40	35	30	30	30
	50	55	70	45	45	60	70	30	40	40	50	50	45	40	30	30
	100	55	65	55	65	70	70	70	40	65	60	60	65	40	70	40
	200	65	70	65	80	60	100	90	60	70	80	70	80	60	90	60
	300	70	85	85	90	85	85	70	100	85	75	80	85	100	70	75
LED27	20	45	40	80	30	50	40	30	30	40	40	40	30	30	30	25
	50	60	50	40	55	55	70	50	30	65	50	45	55	30	50	30
	100	65	50	60	65	85	70	50	40	60	55	70	65	40	50	40
	200	85	80	75	80	75	75	80	70	70	60	65	85	70	80	70
	300	85	80	80	80	80	80	90	80	85	85	80	90	80	90	80
LED40	20	40	50	55	60	55	40	50	30	55	45	45	40	30	30	40
	50	50	50	60	50	60	60	50	40	60	55	55	55	40	50	60
	100	75	60	85	90	65	70	80	80	55	55	70	70	80	50	60
	200	85	80	50	90	60	80	100	70	75	70	75	90	70	80	90
	300	90	95	90	90	65	90	40	90	85	85	90	90	90	100	100
LL27	50	65	65	50	50	85	70	60	40	50	45	55	50	40	40	50
	100	70	60	65	60	50	70	70	50	60	60	60	55	50	60	40
	200	70	85	65	80	60	90	90	60	70	65	70	70	60	70	60
	300	65	80	70	80	75	100	40	60	65	80	70	65	60	90	80
LL40	50	70	60	50	60	85	70	60	70	55	60	45	90	70	40	50
	100	70	60	70	80	55	70	80	50	70	65	70	40	50	60	70
	200	75	75	70	70	75	70	30	80	70	70	70	60	80	80	80
	300	90	90	85	70	90	90	100	100	70	80	75	80	100	100	100

9.3 Helligkeitsbewertungen der zweiten Befragung

	P2	P5	P7	P8	P9	P10
HAL	100	50 40 45 50	55 55 55 55	40 30 35 40 75	60 70 55 65	80 75 75 75
	150	70 55 70 70	65 60 60 60	75 45 60 70 65	80 65 60 80	80 75 80 65
	250	80 55 70 70	80 70 65 70	95 50 95 90 90	85 85 80 70	85 90 90 90
LED27	100	60 70 60 40	65 60 65 55	45 40 30 30 70	65 65 60 60	75 65 70 70
	150	70 55 60 60	70 65 70 60	50 35 40 60 75	80 65 70 75	85 75 80 75
	250	75 75 65 35	65 70 75 70	90 40 85 90 75	80 80 75 75	85 90 70 75
LED40	100	60 70 70 50	60 65 55 65	45 45 35 40 60	75 75 70 70	80 75 70 60
	150	80 85 75 90	75 70 70 70	60 85 60 70 65	90 85 75 75	75 70 80 65
	250	85 90 90 90	90 85 80 80	100 100 95 100 80	90 85 80 85	80 80 75 80
LL27	100	50 40 50 50	60 50 65 55	40 40 25 30 70	60 55 65 65	70 65 80 70
	150	65 70 50 60	65 70 65 65	60 35 50 40 75	70 70 60 65	85 75 75 75
	250	60 75 70 60	70 80 90 70	90 80 85 80 90	80 75 70 75	90 90 75 90
LL40	100	70 60 85 65	70 65 65 70	65 50 40 40 65	75 75 70 60	65 70 65 65
	150	80 80 70 80	75 65 70 85	50 70 75 60 70	75 85 75 75	80 70 70 70
	250	85 80 90 75	85 80 90 80	100 100 100 90 70	80 85 75 80	85 80 85 70

9.4 Äquivalente Szenenleuchtdichten

Szene	$V(\lambda)$	$y_{10}(\lambda)$	$V_m(\lambda)$	Ware-Cowan	Guth	Yaguchi-Ikeda	Nakano	Palmer 1st
HAL 20	20,4	21,3	20,5	19,4	19,8	22,3	25,3	21,3
HAL 50	50,5	52,7	50,5	46,8	48,6	54,2	60,9	52,7
HAL 100	100,1	104,7	100,2	91,3	96,0	106,2	118,1	104,7
HAL 150	156,5	164,0	156,6	140,9	149,6	164,4	181,1	164,0
HAL 200	199,3	209,0	199,5	179,2	190,4	209,1	230,0	209,0
HAL 250	249,9	262,5	250,2	223,2	238,3	260,7	284,9	262,5
HAL 300	299,3	314,5	299,6	267,2	285,4	312,0	340,7	314,5
LED27 20	20,1	21,0	20,1	17,9	19,1	20,9	22,7	21,0
LED27 50	50,1	52,3	50,1	44,6	47,7	52,1	56,6	52,3
LED27 100	100,2	104,5	100,3	89,3	95,4	104,3	113,5	104,5
LED27 150	150,0	156,5	150,2	133,5	142,8	156,0	169,5	156,5
LED27 200	200,5	209,2	200,7	178,7	191,0	208,7	227,2	209,2
LED27 250	250,6	261,4	250,9	223,2	238,6	260,7	283,5	261,5
LED27 300	300,2	313,1	300,5	267,7	285,9	312,6	340,3	313,1
LED40 20	20,5	21,7	20,5	18,4	19,4	21,2	21,2	21,7
LED40 50	49,7	52,7	49,8	44,7	47,0	51,6	51,6	52,7
LED40 100	100,3	106,2	100,5	90,1	94,8	104,0	104,1	106,3
LED40 150	150,0	158,9	150,4	134,7	141,8	155,6	155,5	158,9
LED40 200	200,3	212,2	200,8	180,0	189,4	207,6	208,0	212,2
LED40 250	250,7	265,5	251,2	225,1	236,9	259,9	259,8	265,5
LED40 300	300,7	318,4	301,4	270,1	284,3	311,5	312,3	318,4
LL27 50	50,1	52,3	50,2	44,7	47,9	52,2	56,9	52,3
LL27 100	100,0	104,2	100,2	89,2	95,5	104,2	113,7	104,2
LL27 150	151,4	157,7	151,7	135,1	144,2	158,0	172,6	157,7
LL27 200	199,8	208,0	200,2	178,0	190,2	208,2	227,2	208,0
LL27 250	252,3	262,3	252,7	224,3	239,9	262,5	285,9	262,3
LL27 300	273,3	284,2	273,7	242,8	259,8	284,2	309,3	284,2
LL40 50	56,6	59,8	56,8	51,2	53,7	58,7	58,5	59,8
LL40 100	99,4	104,9	99,7	89,3	94,1	103,2	102,6	105,0
LL40 150	151,9	160,2	152,4	135,2	143,6	158,1	156,5	160,2
LL40 200	199,6	210,5	200,2	178,1	188,7	207,5	205,6	210,5
LL40 250	250,8	264,2	251,6	223,1	237,0	261,1	257,8	264,2
LL40 300	273,7	288,3	274,5	243,7	258,7	284,9	281,5	288,3
HAL 20	20,4	21,3	20,5	19,4	19,8	22,3	25,3	21,3

Szene	Palmer 2nd	Sagawa-Takeichi	Nakano-Ikeda	Kokoschka-Bodmann	Trezona	CIE 200	Brightness Lumens	SWS Lumens
HAL 20	21,2	22,3	24,1	23,3	18,2	18,8	20,4	11,1
HAL 50	52,7	51,3	58,2	57,2	43,5	45,1	52,7	28,8
HAL 100	104,8	95,8	113,2	111,8	84,3	87,6	108,3	59,5
HAL 150	164,3	143,1	174,2	173,6	133,9	134,8	174,6	96,2
HAL 200	209,3	179,9	221,2	220,9	171,1	170,9	223,7	123,2
HAL 250	263,0	219,7	274,6	275,7	212,4	212,3	286,1	157,9
HAL 300	315,0	261,0	328,4	330,3	253,5	253,6	343,5	189,6
LED27 20	21,0	19,1	21,9	21,8	16,6	17,7	22,1	12,9
LED27 50	52,4	46,4	54,6	54,8	41,1	43,3	55,1	32,1
LED27 100	104,7	91,2	109,3	109,5	82,1	85,7	109,8	64,3
LED27 150	156,8	134,4	163,4	164,2	126,0	127,5	165,1	96,3
LED27 200	209,4	178,7	218,8	219,9	170,3	170,0	219,5	128,7
LED27 250	261,7	221,3	273,1	274,9	211,8	211,8	275,1	161,0
LED27 300	313,4	264,5	327,8	329,9	253,2	253,6	328,4	192,6
LED40 20	22,0	19,6	20,8	22,8	17,3	17,5	26,6	15,5
LED40 50	53,1	45,8	50,4	55,4	41,6	41,5	64,4	37,6
LED40 100	106,9	89,9	101,7	111,6	83,8	82,6	129,8	75,9
LED40 150	159,7	132,1	151,9	167,4	128,8	122,6	194,5	113,5
LED40 200	213,1	174,5	203,2	223,9	173,4	163,1	259,1	151,6
LED40 250	266,5	216,1	253,8	280,4	216,0	203,4	324,7	189,7
LED40 300	319,5	257,4	305,0	336,6	258,4	243,5	388,6	227,5
LL27 50	52,3	46,9	54,8	54,9	41,3	43,4	53,7	32,7
LL27 100	104,3	91,7	109,5	109,3	82,0	85,8	106,5	64,1
LL27 150	157,8	137,4	166,2	166,0	127,6	129,7	160,1	93,9
LL27 200	208,1	179,4	218,7	218,9	169,5	170,4	211,2	124,4
LL27 250	262,5	224,2	275,3	275,9	212,6	214,4	266,1	156,6
LL27 300	284,3	242,0	297,9	298,8	229,8	231,9	288,5	170,0
LL40 50	60,2	52,8	57,1	63,4	47,7	47,0	71,9	43,8
LL40 100	105,5	89,5	100,1	110,5	83,0	81,7	125,7	76,0
LL40 150	160,9	132,1	152,6	167,6	128,7	124,3	190,7	114,2
LL40 200	211,3	172,5	200,6	221,0	171,0	162,5	250,9	150,8
LL40 250	265,1	213,6	251,4	276,9	213,3	203,7	314,0	188,6
LL40 300	289,2	232,7	274,5	302,5	232,6	222,0	342,4	206,1
HAL 20	21,2	22,3	24,1	23,3	18,2	18,8	20,4	11,1

10 Liste eigener Publikationen

Pepler, W.; Khanh, T.Q. 2009. Comparison between the CCR and PWM dimming methods on high power LEDs. Darmstadt : International Symposium on Automotive Lighting, 29.-30. September 2009

Khanh, T.Q.; Schiller, C.; Kuhn, T.; Pepler, W.; Brückner, S. 2010. *Lichttechnische und technologische Aspekte der LED-Straßenbeleuchtung.* LICHT 7-8, 2010

Pepler, W.; Khanh, T.Q. 2012. *Messungen der natürlichen Beleuchtung im Freien und im Büro.* Berlin : Licht und Gesundheit 2012, 15.-16. März 2012

Pepler, W.; Böll, M.; Khanh, T.Q. 2012. *Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungskonzepte und Lampenspektren in der Innenraumbeleuchtung.* Berlin : Licht 2012, 11.-14. September 2012

Böll, M.; Geßner, F.; Pepler, W.; Khanh, T.Q. 2012. *Innenraumbeleuchtung mit LED- und Leuchtstofflampen – lichttechnische und visuelle Feldtests.* Berlin : Licht 2012, 11.-14. September 2012

Khanh, T.Q.; Pepler, W. 2012. Lampenspektrum & Wahrnehmung – Raumwirkung, Farbwiedergabe, Farbpräferenz, Helligkeit. LICHT 7-8, 2012

Pepler, W.; Khanh, T.Q. 2013. Museumsbeleuchtung – Lichtquellen, Reflexionsspektren, optische Objektschädigung (Teil 1). LICHT 1-2, 2013

Pepler, W.; Khanh, T.Q. 2013. Museumsbeleuchtung – Lichtquellen, Reflexionsspektren, optische Objektschädigung (Teil 2). LICHT 3, 2013

Pepler, W.; Schiller, C.; Khanh, T.Q. 2013. *Kommunen in neuem Licht – Praxiserfahrungen zur LED in der kommunalen Beleuchtung.* Düsseldorf : VDI Technologiezentrum, 2013

Khanh, T.Q.; Pepler, W.; Geßner, F. 2013. *LED-Licht im Lenbachhaus – eine lichttechnische Evaluierung und Betrachtung.* LICHT 7-8, 2013

Khanh, T.Q.; Pepler, W. 2014. *Museumsbeleuchtung – lichttechnisch-farbmétrische Grundsätze und Anwendungen.* Handbuch für Beleuchtung, 63. Ergänzungslieferung, März 2014

11 Lebenslauf

Wjatscheslaw Pepler

Zum Taubengarten 27, Gelnhausen

eMail: pepler@photometrik.de

Geb. am 07. August 1982
in Odessa/Ukraine

Schulbildung

09/1988 – 02/1996	Mittelschule №117, Odessa
04/1996 – 11/1997	Hauptschule Gerolstein
12/1997 – 06/1998	Hauptschule »Am Gleisberg«, Mainz
08/1998 – 06/2001	Technisches Gymnasium Mainz

Studium

10/2001 – 03/2008	Technische Universität Darmstadt
	Diplomstudiengang: Elektrotechnik und Informations- technik
	Vertiefungsrichtung: Mikroelektronik

Praktika

07/2001 – 08/2001	IBM Deutschland Speichersysteme GmbH, Mainz
11/2006 – 03/2007	OSRAM GmbH, Regensburg

Nebentätigkeiten

09/2002 – 10/2006	Aushilfe in Mainzer Alten- und Wohnheime gGmbH
04/2007 – 05/2007	Werkstudent bei OSRAM GmbH, Regensburg
02/2008 – 03/2008	Werkstudent bei OSRAM GmbH, Regensburg

Beruflicher Werdegang

06/2008 – 05/2014	Technische Universität Darmstadt Wissenschaftlicher Mitarbeiter
07/2013 –	PHOTOMETRIK GmbH Gesellschafter-Geschäftsführer

12 Erklärung laut §9 PromO

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Ort, Datum

Wjatscheslaw Pepler